

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Чуйдук Иван Александрович

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИЙ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор,
С.А. Ганджа

Челябинск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОМПОНОВКИ ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИЙ ДЛЯ ГИБРИДНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА	17
1.1 Анализ существующих тяговых электродвигателей для электротрансмиссий. Выбор базового варианта	18
1.2 Конструкция и принцип действия ВЭКВ для мотор-колеса	21
1.3 Разработка математической модели ВЭКВ на основе схем замещения	24
1.4 Входные параметры	26
1.4.1 Константы	27
1.4.2 Ограничения	27
1.4.3 Независимые переменные	28
1.4.4 Выходные параметры	28
1.5 Алгоритм электромагнитного расчета ВЭКВ	29
1.6 Блок-схема алгоритма расчета ВЭКВ	40
Выводы по главе 1	48
2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЭКВ.....	49
2.1 Требования, предъявляемые к математической модели	50
2.2 Требования, предъявляемые к системе оптимизации	50
2.3 Требование совместимости с существующими программными системами.....	51
2.4 Выбор типа оптимизации	52
2.5 Выбор метода оптимизации	54
2.5.1 Формирование уровней оптимизации.....	55
2.5.2 Полная габаритная оптимизация	56
2.5.3 Оптимизация при фиксированном числе полюсов	57
2.5.4 Оптимизация при заданном наружном диаметре	58
2.5.5 Оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре	58
2.5.6 Оптимизация при заданной наружной длине	58
2.5.7 Оптимизация при заданных наружном и внутреннем диаметрах ..	59

2.5.8 Оптимизация при заданном наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине.....	59
2.5.9 Оптимизация при фиксированных размерах постоянного магнита	60
2.5.10 Поверочный расчет	60
Выводы по главе 2.....	61
3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО АНАЛИЗА ВЭКВ	63
3.1 Разработка модели электромагнитного анализа ВЭКВ	63
3.2 Моделирование электронного коммутатора для анализа динамических характеристик	67
3.3 Разработка подсистемы теплового анализа ВЭКВ	70
Выводы по главе 3.....	76
4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ МОТОР-КОЛЕСОМ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ...	78
4.1 Разработка математической модели алгоритма управления ВЭКВ	79
4.2 Блок-схема алгоритма управления ВЭКВ	85
4.3 Проверка алгоритма управления ВЭКВ при движении цифрового двойника электроболоида по трассе.....	88
Выводы по главе 4.....	92
5 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА МОТОР-КОЛЕСА НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	94
5.1 Проектирование макетного образца мотор-колеса	94
5.2 Испытания макетного образца.....	103
Выводы по главе 5.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	108
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОПИСАНИЕ РАБОТ ЗАРУБЕЖНЫХ УЧЕНЫХ ПО РАЗРАБОТКЕ МОТОР-КОЛЕС	132
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ЧЕРТЕЖИ НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫХ УЗЛОВ КОНСТРУКЦИИ МОТОР-КОЛЕСА	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность предмета исследования. В настоящее время во всем мире идет активный переход на гибридный и электротранспорт. Международное энергетическое агентство прогнозирует, что мировой парк электромобилей к 2030 году достигнет 230 млн. единиц машин, что составляет 12% от всех автомобилей в мире. Ежегодный рост парка электромобилей составляет около 15%. Во многих странах существуют государственные программы, направленные на развитие электротранспорта.

Данный факт обусловлен рядом преимуществ, которыми обладает гибридный и электротранспорт:

- электромобили не выделяют вредные выхлопные газы при движении, даже если мы будем рассматривать весь процесс генерации и потребления энергии для электромобиля, начиная от добычи газа (угля, жидкого топлива) для снабжения ТЭЦ. Электромобиль в разы превосходит двигатели внутреннего сгорания по эффективности преобразования энергии, и, как следствие, по количеству остаточных вредных продуктов сгорания.

- электротранспорт значительно снижает уровень шума, особенно в больших мегаполисах. Повышенный шум может привести к проблемам со здоровьем, а также стать катализатором стресса. Любой звук выше 60 децибел может повысить риск сердечно-сосудистых заболеваний (звук, издаваемый автомобилем с ДВС, находится на уровне 70 децибел).

- стоимость эксплуатации электромобиля гораздо ниже за счет сниженной потребности в смазывающих материалах и более дешевой зарядки.

- электродвигатель способен развивать максимальный крутящий момент за сотые доли секунды, что обеспечивает высокую динамику разгона.

- электромобиль может использовать рекуперативное торможение для зарядки АКБ, что делает его еще более энергоэффективным.

Несмотря на значительную историю развития гибридного и электротранспорта, мировое научное сообщество не пришло к единому мнению относительно

компоновки трансмиссии электромобиля и типа используемой электрической машины.

В настоящее время можно выделить 3 основные компоновки трансмиссии электромобилей:

1. Классическая компоновка, при которой электродвигатель находится в корпусе транспортного средства и передает крутящий момент на колеса с помощью полуосей, понижающего редуктора и/или механического дифференциала.

2. Трансмиссия с индивидуальным приводом колес, но электродвигатели так же находятся в корпусе транспортного средства и соединены с колесами либо напрямую через полуоси, либо через полуоси и понижающий редуктор.

3. Трансмиссия на базе мотор-колес. Электродвигатель и компактный понижающий редуктор находятся непосредственно в колесе.

Наиболее перспективным вариантом на сегодняшний день является трансмиссия на основе мотор-колес. Данный вид трансмиссии имеет ряд преимуществ, такие как высокий КПД, повышенная динамика, простота реализации любого алгоритма активной безопасности, отсутствие сложных передаточных механизмов, освобождение внутреннего пространства автомобиля.

Для электротрансмиссии на основе мотор-колес, как и для других видов трансмиссии, необходимо решить вопрос выбора оптимального приводного электродвигателя. На данный момент наиболее популярными электродвигателями для электротрансмиссий являются асинхронные электродвигатели и вентильные электродвигатели с высококоэрцитивными постоянными магнитами классической конструкции. В то же время, если использовать вентильные электродвигатели комбинированного возбуждения, то можно добиться широкого диапазона регулирования при меньших габаритах, что очень важно для транспортных средств, которым необходим высокий момент при пуске и высокие скорости во время движения.

На данный момент в мире существуют различные варианты конструкций электродвигателей комбинированного возбуждения, но все они имеют

существенные недостатки, не позволяющие им выйти на широкий рынок: низкие массогабаритные характеристики, наличие паразитных зазоров.

В Южно-Уральском государственном университете (ЮУрГУ) разработана конструкция вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения (далее – ВЭКВ), которая обладает всеми преимуществами электрических машин комбинированного возбуждения, но при этом исключает недостатки предыдущих конструкций, а именно наличие: паразитного воздушного зазора, сложной магнитной цепи, дополнительного рассеяния магнитного потока. Эта конструкция может составить основу для проектирования ряда мотор-колес на различную мощность и частоту вращения, но на сегодняшний день для нее не существует отработанных методик анализа и синтеза, что осложняет серийное освоение этого изделия.

В связи с этим разработка проектной системы, реализующей синтез конструкции на основе оптимизации геометрии и анализ полученных конструктивных решений является актуальной научной и инженерной задачей.

Степень научной разработанности исследуемой темы. Первый электромобиль был создан в 1841 году и представлял собой тележку с электродвигателем. В дальнейшем было проведено множество научных изысканий, в ходе которых электромобиль претерпел значительные изменения [59, 66, 158].

Многие научные коллективы трудятся над разработкой узлов и принципов работы электротрансмиссии, в том числе и на базе ВЭКВ.

Ученые К.Л. Ковалев, Р.И. Ильясов, Ю.И. Кован, Д.С. Дежин Московского авиационного института (национального исследовательского университета) вели разработку двухпакетной электрической машины с комбинированным возбуждением, с целью повышения массоэнергетических и эксплуатационных показателей электрической машины [105].

Ученые С.А. Ганджа, А.И. Согрин, С.Г. Воронин Южно-Уральского государственного университета внесли существенный вклад в развитие электрических машин комбинированного возбуждения [21-55, 102-104, 113-114].

Ученый Д.С. Аминов из Института энергетики Таджикистана вел разработку гидрогенераторов на базе электрических машин комбинированного возбуждения [2, 165-170].

Ученые В.А. Калий, Д.А. Ситин, М.В. Панихин, Р.Ю. Мисютин из АО «Технодинамика» (г. Москва) вели разработку электрогенераторов на базе электрических машин комбинированного возбуждения собственной разработки [101].

Ученые Д.В. Левин, Э.Я. Лившиц, М.М. Юхнин из ООО «СИБНАНОТЕХ» (г. Новосибирск,) разрабатывали двухпакетную электрическую машину комбинированного возбуждения [100].

Ученые Е.Н. Попков, А.О. Фешин из Высшей школы электроэнергетических систем Института энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого работали над созданием шестифазной синхронной машины с комбинированным возбуждением для исследования процессов в электроэнергетических системах [120].

В наукометрических базах Scopus и Web of Science содержится большое количество публикаций, связанных с электрическими машинами комбинированного возбуждения. В иностранных статьях есть материалы об исследованиях, связанных с использованием электрических машин комбинированного возбуждения именно в качестве тяговых электродвигателей для транспортных средств. Также имеются материалы об электрогенераторах на базе машин комбинированного возбуждения. Рассмотрены различные варианты моделирования и расчета электрических машин комбинированного возбуждения, учитывающие нелинейные характеристики материалов и особенности взаимодействия магнитных потоков, создаваемых постоянными магнитами и обмоткой возбуждения. Описание научных трудов на вышеуказанные темы находятся в Приложении 1.

Следует отметить следующих иностранных ученых и инженеров, внесших существенный вклад в развитие электротрансмиссий и, в частности, мотор-колес:

- der Akademische Motorsportverein Zürich (AMZ) Урс Штайнер (Urs Steiner) – технический директор Akademischer Motorsportverein Zürich (AMZ), Formula Student в ETH Zurich (Швейцария);

- центр разработки технологий силовых агрегатов в NSK Ltd. в Токио (Япония) Шин Ямамото (Shin Yamamoto), Рюхо Морита (Ryuho Morita), Мицуру Ойке (Mitsuru Oike);

- институт производственных технологий и прикладных исследований материалов IFAM в Бремене, Германия (das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM) Michael Gröninger, Felix Horch, Alexander Kock, Доктор Hermann Pleteit;

- институт Фраунгофера по прочности конструкций и надежности систем LBF (Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF), Германия, Николь Швейцер (Nicole Schweizer), Андреас Гиссл (Andreas Giessel), Оливэр Шварцхаупт (Oliver Schwarzhaupt);

- Магдебургский университет Отто-фон-Герике (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg), Германия, проф. д.т.н. Роланд Каспер (Roland Kasper), инженер Мартин Шунеманн (Martin Schünemann);

- компания Schaeffler KG в Херцогенаурахе (der Schaeffler KG) Бернд Гомберт (Bernd Gombert) – руководитель отдела мехатроники, доктор Рафаэль Фишер (Raphael Fischer) – специалист по приводным, доктор Вольфганг Хенрих (Wolfgang Heinrich) – специалист по электродвигателям;

- конструкторское бюро Evomotiv GmbH и Университет прикладных наук Оффенбурга (Das Ingenieurbüro Evomotiv GmbH und die University of Applied Sciences Offenburg), Германия Герхард Кребс (Gerhard Krebs) – управляющий директор, Рольф Вебер (Rolf Weber) возглавляет отдел разработки электроники, Саймон Леппельсак (Simon Leppelsack) – руководитель проекта концепций электропривода, Ульрих Хохберг (Ulrich Hochberg) является деканом магистерской

программы ММЕ факультета машиностроения Оффенбургского университета прикладных наук;

- компания Schaeffler Technologies AG & Co. KG в Херцогенаурахе (Schaeffler Technologies AG & Co. KG in Herzogenaurach), Германия Манфред Краус (Manfred Kraus), Кристиан Харкорт (Christian Harkort), Бенджамин Вюбболт-Горбатенко (Benjamin Wuebbolt-Gorbatenko), Мартин Лауманн (Martin Laumann);

- Венский технический университет (TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN), Австрия, Андреас Эйленбергер (Andreas Eilenberger), Манфред Шродль (Manfred Schro), Флориан Деммельмайр (Florian Demmelmayr);

- Университет прикладных наук Цвикау (Westsächsische Hochschule Zwickau), Германия Александр Заутер (Alexander Sauter), Андре Леманн (Andre Lehmann), Себастиан Фетке (Sebastian Fethke), Кристиан Хеннинг (Christian Hennig);

- Фраунгоферовский институт промышленной инженерии и организации в Штутгарте, Институт машиностроения и автоматизации им. Фраунгофера в Штутгарте, Германия Алексей Бутов (Alexej Butov), Флориан Херрманн (Florian Herrmann), Михаил Меркерт (Michael Merkert), Франк Нейлз (Frank Nägele).

Описание разработок этих ученых приведено в Приложении 1.

Федеральный институт промышленной собственности содержит обширную базу патентов на изобретения и полезные модели по разработке мотор-колес, в том числе и с двигателями комбинированного возбуждения [106-112].

Анализ научной проработанности данного вопроса показывает, что тема применения электрических машин комбинированного возбуждения является актуальной, о чем свидетельствует большое количество публикаций как в отечественных, так и в иностранных наукометрических базах. На сегодняшний день разработано большое количество вариантов электромеханических трансмиссий, конструкций и компоновок мотор-колес, рассмотрены разные типы электродвигателей и систем управления, применены новые конструктивные материалы.

Однако на данный момент все эти исследования носят разрозненный характер и привязаны к конкретной конструкции транспортного средства. Окончательно не

решен вопрос о наиболее приемлемом электродвигателе для мотор-колеса, соответственно, не отработаны методики его расчета применительно к электротрансмиссии, не решены вопросы методов и критериев оптимизации основных размеров электродвигателя, вопросы его эффективного охлаждения, типа редуктора, общей компоновки статора и ротора, системы управления мотор-колесом и трансмиссией в целом. Из имеющейся информации невозможно построить конструкторскую систему по проектированию не одного, а ряда подобных мотор-колес, которая включала бы в себя синтез и анализ данной трансмиссии.

Этот факт делает разработку такой системы актуальной и востребованной, особенно в контексте интенсивного развития современного электротранспорта.

Цель диссертационного исследования - разработка усовершенствованных систем синтеза, анализа и управления вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения для мотор-колеса электромеханической трансмиссии транспортных средств на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации.

Задачи исследования. Для достижения этой цели необходимо последовательно решить следующие научные задачи:

- провести анализ существующих типов трансмиссий и тяговых электродвигателей;
- разработать методику и математическую модель анализа ВЭКВ на основе схем замещения;
- разработать систему синтеза ВЭКВ на основе параметрической многоуровневой оптимизации;
- разработать систему анализа электромагнитного состояния ВЭКВ с использованием имитационного моделирования;
- разработать систему анализа теплового состояния ВЭКВ на базе компьютерного моделирования;

- разработать алгоритм эффективного управления ВЭКВ применительно к транспортному средству;

– разработать проектную систему синтеза и анализа электромагнитных характеристик ВЭКВ на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования;

– исследовать работоспособность и качество функционирования макетного образца мотор-колеса в различных режимах.

Объект исследования. Объектом исследования является вентильная электрическая машина комбинированного возбуждения, встроенная в мотор-колесо в качестве тягового двигателя.

Предмет исследования. Предметом исследования являются физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование вентильной машины комбинированного возбуждения, как элемента электротехнического комплекса электротрансмиссии транспортных средств, включая параметрическую оптимизацию на этапе синтеза и разработку алгоритмов эффективного управления на этапе анализа.

Методология и методы исследования. Поставленные научные задачи решены с применением общей теории электрических машин, методов проектирования на основе схем замещения, методов нелинейного программирования для решения задачи оптимизации, метода конечных элементов для решения задач электромагнитного и теплового анализа, методов физического моделирования, методов трехмерного твердотельного моделирования.

Научная новизна. Научную новизну составляет методика расчета ВЭКВ на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации. К научной новизне следует отнести эффективные алгоритмы управления тяговым электродвигателем транспортного средства.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения, составленная на основе метода схем замещения

и предназначенная для синтеза оптимальной геометрии активных частей, **отличающаяся** учетом особенностей конструкции магнитной системы.

2. Метод параметрической многоуровневой оптимизации вентильного двигателя комбинированного возбуждения, **отличающийся тем**, что позволяет создать гибкую проектную систему, реализующую множество проектных ситуаций.

3. Математическая модель анализа вентильного двигателя комбинированного возбуждения, которая **в отличие от существующих** моделей позволяет комплексно оценить электромагнитное и тепловое состояние на основе компьютерного моделирования.

4. Алгоритм эффективного управления вентильным электродвигателем комбинированного возбуждения, **которая учитывает особенности управления** одновременно по цепи якоря и цепи возбуждения и обеспечивает широкий диапазон изменения частот вращения и моментов.

5. Проектная система по разработке вентильного двигателя комбинированного возбуждения на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации, рассчитанная на проектирование ряда вентильных двигателей для мотор-колес, **которая разработана впервые** и позволяет проводить проектные расчеты для различных технических заданий за счет гибкости системы синтеза и комплексной системы анализа.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы. Полученные в работе научные результаты соответствуют пп. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования», пп. 2. «Разработка научных основ проектирования,

создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов», пп.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления» паспорта специальности.

Теоретическая значимость. Данное научное исследование является продолжением развития теории вентильных машин комбинированного возбуждения в части расчета магнитной системы, методов параметрической многоуровневой оптимизации, методов анализа электромагнитного и теплового состояния на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования.

Практическая значимость. Существующие конструкции электрических машин комбинированного возбуждения имеют объемную магнитную систему, обусловленную наличием паразитного воздушного зазора, увеличенные габариты и массу, сложную технологию изготовления, низкие энергетические показатели за счет магнитного рассеяния. Представленная к защите конструкция лишена этих недостатков, что является инновационным решением. К практическим результатам данного исследования следует отнести создание проектной системы на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации. Разработанная проектная система предназначена для внедрения в инженерную практику с целью разработки ряда ВЭКВ, которые имеют оптимальные геометрические размеры и наилучшие массоэнергетические параметры. В перспективе данная проектная система может составить основу проектирования электротрансмиссий этого класса. Практическую значимость имеет программа анализа транспортного средства при тестировании ее на конкретных трассах и маршрутах с учетом уклонов рельефа, динамики разгона и торможения. В результате проведенных испытаний исследованы работоспособность и качество функционирования мотор-колеса на базе вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях. Разработанный макетный

образец может быть основой серийных мотор-колес для транспортных средств различного назначения.

Проект поддержан грантом Федерального государственного бюджетного учреждения «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям). Договор №16559ГУ/2021 о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов в рамках реализации инновационного проекта от 01.06.2021.

Внедрение результатов работы. Методика расчета ВЭКВ на основе схем замещения, методика многоуровневого оптимального проектирования и методики оценки электромагнитного и теплового состояния внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника в курсе «Проектирование электрических машин общего и специального назначения».

Степень достоверности результатов работы. Достоверность полученных научных результатов подтверждается корректным использованием известных методов анализа и синтеза, применяемых в общей теории электрических машин, таких как метод схем замещения, метод конечных элементов, методы нелинейного программирования. Технологичность и собираемость разработанной конструкции проверена на масштабной модели, изготовленной по технологии 3D-принтера. Итоговая корректность работы проектной системы и расчетные характеристики ВЭКВ были проверены на макетном образце в ходе натурных испытаний.

Апробация работы. Основные положения результатов диссертационной работы и отдельные ее части докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

- 4-я научная выставка-конференция научно-технических и творческих работ студентов (Челябинск 2017);
- Международная научно-практическая конференция Института агроинженерии (Челябинск 2019);

- Научный семинар аспирантов «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry» (Магнитогорск 2020);
- Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг 2021»;
- Научный семинар аспирантов «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry» (Магнитогорск 2021);

Публикации по теме диссертации. По результатам диссертационной работы опубликовано **11** работ, из них **6** статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе **5** работ индексированы в базе данных Scopus; **2** свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора в диссертационное исследование. Все научные результаты, включенные в диссертацию и представленные к защите, получены лично автором. Личный вклад диссертанта в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в определении направлений исследований, постановке задач, разработке математических и имитационных моделей.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Гандже Сергею Анатольевичу за конструктивную критику и содействие при работе над диссертацией.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 182 наименований, 2 приложений. Работа изложена на 145 страницах, из них 107 страниц основного текста. Работа содержит 48 иллюстраций, 142 аналитических выражений, 2 таблицы.

Диссертация имеет следующую структуру и логику построения.

Во введении показана актуальность выбранной темы. Представлены: степень научной разработанности исследуемой темы, задачи исследования, объект и предмет исследования, примененные в работе методы исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту, соответствие паспорту специальности, практическая значимость и результаты внедрения, апробация и публикации по теме диссертационного исследования.

В первой главе проведен сравнительный анализ различных вариантов электротрансмиссий и тяговых электродвигателей для них. Выбран базовый вариант электротрансмиссии и тягового электродвигателя. Разработана математическая модель ВЭКВ и блок-схема алгоритма расчета по разработанной математической модели.

Вторая глава посвящена проектной системе, которая реализует систему синтеза ВЭКВ на основе многоуровневой однокритериальной оптимизации. Система реализует 8 уровней - от полной габаритной оптимизации до поверочного расчета.

В третьей главе описана разработка системы анализа ВЭКВ на базе программной среды Ansys Electronics Desktop, связанной с системой синтеза через программный код, который передает исходные данные из системы синтеза в систему анализа.

В четвертой главе разработана математическая модель управления ВЭКВ в составе мотор-колеса электротрансмиссии транспортного средства. Представлен алгоритм управления по цепи якоря и по цепи возбуждения. Разработана программа цифрового тестирования электротрансмиссии на базе мотор-колеса при прохождении транспортным средством конкретной трассы.

В пятой главе описана разработка конструкции макетного образца мотор-колеса на базе ВЭКВ, основой для разработанной конструкции послужили выходные данные проектной системы. Представлены результаты испытаний макетного образца мотор-колеса.

Заключение содержит выводы, сделанные по результатам всей работы. Определены направления дальнейших исследований в области теории и инженерной практики.

В работе имеется 2 приложения, содержащих описание разработок иностранных ученых в области электротрансмиссий на основе мотор-колес, чертежи наиболее значимых узлов макетного образца ВЭКВ.

1 АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОМПОНОВКИ ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИЙ ДЛЯ ГИБРИДНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Вводные замечания

На сегодняшний день в общемировой практике известны три основные компоновочные схемы электротрансмиссии [154]. Первая схема включает в себя электродвигатель, расположенный в корпусе автомобиля и соединенный с колесом через редуктор, механический дифференциал и полуоси. (рисунок В.1.1. а). Данная схема была популярна в серийных электромобилях, так как является наиболее простой для реализации. Недостатком данной схемы является наличие сложной трансмиссии, следствием чего является большой вес автомобиля, низкий КПД трансмиссии и трудоемкость обслуживания.

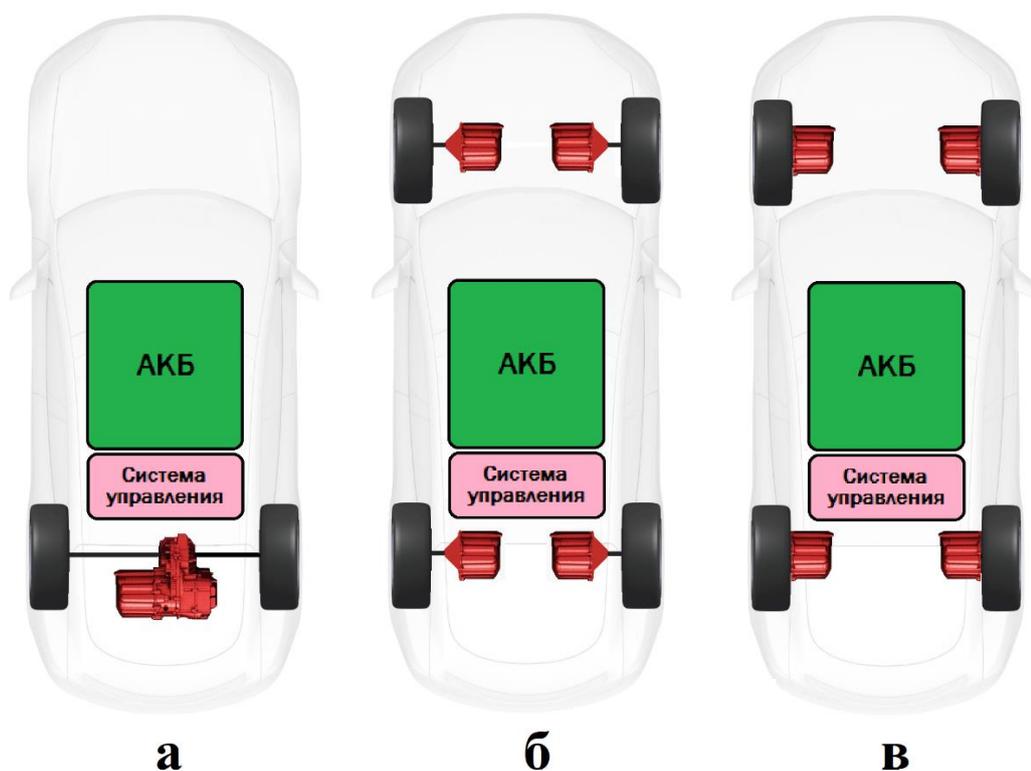


Рисунок В.1.1 - Виды компоновки трансмиссий

Второй вариант включает в себя два электродвигателя, установленных в корпусе автомобиля и соединенных с колесом через понижающий редуктор (рисунок В.1.1. б). Преимуществами данной схемы являются повышенная динамика, так как крутящий момент передается напрямую от двигателя к колесу, уменьшенные габариты и вес трансмиссии. Данные преимущества стали доступны благодаря замене механического дифференциала электронным. Применение

электронного дифференциала позволяет существенно увеличить надежность трансмиссии.

Наиболее перспективным и интересным с научной точки зрения является третий вариант компоновки трансмиссии, который включает в себя два или четыре мотор-колеса (рисунок В.1.1. в). Применение мотор-колес дает ряд существенных преимуществ: снижение общего веса электромобиля, повышенная динамика и маневренность, высокий КПД, простота реализации любых алгоритмов активной безопасности (ABS, ESP, Traction Control), освобождение внутреннего пространства электромобиля. В принципе, для привода с четырьмя мотор-колесами можно отказаться от рулевого колеса для управления и заменить его джойстиком, способным управлять всеми колесами. О перспективности варианта трансмиссии на основе мотор-колес говорит и тот факт, что рекорд ускорения от 0 до 100 км/ч, равный 1,513 с, принадлежит электробolidу швейцарской гоночной команды «GREEN TEAM», оснащенной четырьмя мотор-колесами [154].

На основе вышеизложенного была поставлена задача разработки мотор-колеса для электротрансмиссии наземных транспортных средств.

1.1 Анализ существующих тяговых электродвигателей для электротрансмиссий. Выбор базового варианта

Важнейшей частью мотор-колеса, определяющей его эксплуатационные характеристики, является тяговый электродвигатель.

В современной практике в качестве тяговых электродвигателей для электротрансмиссий в основном используются асинхронные электродвигатели, вентильные электродвигатели с постоянными магнитами, вентильно-индукторные электродвигатели, а также коллекторные электродвигатели постоянного тока.

Асинхронные электродвигатели наиболее часто используются в качестве тяговых электродвигателей для электромобилей. Электродвигатели данного типа используются, например, в электромобилях компании Tesla, а также в электромобиле Nissan Leaf. Но асинхронные электродвигатели даже в связке с современными преобразователями частоты не могут обеспечить требуемый диапазон регулирования без применения дополнительных редукторов или

дублирующих двигателей. Практика показала, что по удельным энергетическим показателям тяговые асинхронные электродвигатели уступают электродвигателям с постоянными магнитами. [8, 117, 134].

Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами только набирают популярность в современном автомобилестроении. Преимуществами таких электродвигателей являются повышенный КПД и удельная мощность, но так как для возбуждения электродвигателя используются постоянные магниты, регулировка скорости и момента осуществляется только по якорной цепи, что ограничивает регулирование моментов и частоту вращения и усложняет систему управления [67, 123].

Вентильно-индукторные электродвигатели являются весьма надежными, но помимо низкого КПД и удельной мощности имеют высокие пульсации выходного момента, которые обусловлены конструкцией ротора вентильно-индукторного электродвигателя. Пульсации момента и низкая удельная мощность позволяют использовать данный тип электродвигателей в основном только в тяжелой технике, например, бульдозер ДЭТ-400 [99, 125, 148].

Коллекторные электродвигатели постоянного тока постепенно уходят из современного электротранспорта из-за наличия щеточно-коллекторного узла, который имеет низкий ресурс и требует частого обслуживания [68-73].

Проведя анализ вышеперечисленных вариантов, можно сделать вывод о том, что все вышеуказанные электродвигатели имеют один существенный недостаток – ограниченный диапазон регулирования при низких массогабаритных характеристиках. Широкий диапазон регулирования критически важен для транспортных средств, так как транспортному средству нужен высокий момент на старте и высокая скорость во время движения.

В диссертационном исследовании предлагается использовать вентильный электродвигатель комбинированного возбуждения (далее ВЭКВ) обращенной конструкции в качестве приводного электродвигателя для мотор-колеса, так как он наиболее полно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к мотор-колесу.

Покажем эти преимущества перед, например, двигателем с возбуждением только от постоянных магнитов.

Частоту вращения вентильного двигателя n можно определить по приведенной ниже формуле:

$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{C_E \cdot \Phi_\delta}, \quad (1.1)$$

где U – напряжение питания; I_a – ток якоря; R_a – активное сопротивление цепи якоря; C_E – машинная постоянная; Φ_δ – рабочий магнитный поток.

Вентильная машина с постоянными магнитами свой рабочий магнитный поток Φ_δ менять не может. Изменение результирующего магнитного потока возможно только за счет смещения коммутации с нейтрального положения, что приводит к потере мощности. Регулировка частоты вращения машины с комбинированным возбуждением возможна как по цепи якоря, так и по цепи возбуждения, что обеспечивает широкий диапазон регулирования. При этом, из теории известно, что регулировка по цепи возбуждения энергетически очень выгодна, так как по ней проходит от 1.0-5.0 % потребляемой мощности двигателя.

Комбинация возбуждения от обмотки и магнита дает следующие преимущества. При электромагнитном возбуждении рабочий магнитный поток Φ_δ зависит от площади поперечного сечения магнитопровода и площади поперечного сечения обмотки возбуждения, то есть от линейных размеров a в 4-той степени.

$$\Phi_\delta \equiv a^4. \quad (1.2)$$

При возбуждении от постоянных магнитов магнитный поток Φ_δ зависит от объема, то есть от линейных размеров a в 3-ей степени. Таким образом, если мы часть магнитного потока заменим постоянными магнитами, то существенно уменьшим габариты. При этом, использование обмотки возбуждения позволяет регулировать магнитный поток и упрощает электронную аппаратуру, так как суммарный поток Φ_Σ образуется от потока обмотки возбуждения $\Phi_{ОВ}$ и потока постоянных магнитов $\Phi_{ПМ}$.

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\text{ПМ}} + \Phi_{\text{ОВ}}. \quad (1.3)$$

Таким образом, применение машин комбинированного возбуждения позволяет уменьшить габариты за счет мощных высококоэрцитивных магнитов и обеспечить широкий диапазон регулирования за счет применения обмотки возбуждения.

Регулирование крутящего момента и частоты вращения в ВЭКВ происходит как за счет регулирования величины питающего напряжения, так и за счет регулирования магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения. Данный принцип позволяет обеспечить широкий диапазон регулирования скорости и момента при относительно малой массе и габаритах. Использование высококоэрцитивных постоянных магнитов позволяет сэкономить массу и объем двигателя, что позволяет разместить его непосредственно в колесе электромобиля.

1.2 Конструкция и принцип действия ВЭКВ для мотор-колеса

При всем многообразии конструкций ВЭКВ для мотора колеса лучше всего подходит обращенная конструкция, в которой ротор расположен снаружи, а статор - внутри (см. рисунок 1.2.1).

Статор ВЭКВ состоит из шихтованных пакетов 1 и 2, содержащих пазы для якорной обмотки. Пакеты располагаются отдельно в осевом направлении. Они насаживаются на массивный магнитопровод 4 и 5. Магнитопровод может состоять из двух частей. В этом случае эти части соединяются со втулкой 6. Возможно конструктивное исполнение, когда одна часть магнитопровода выполняется заодно со втулкой. Между массивными частями магнитопровода расположена обмотка возбуждения 7. Она имеет кольцевую форму, при этом намагничивающая сила обмотки возбуждения обеспечивает создание магнитного потока для всех полюсов. Ротор расположен снаружи статора. Обращенная конструкция очень технологична для мотор-колеса. Ротор представляет собой магнитопровод в форме кольца. В кольце расположены постоянные магниты 9 и магнитопроводящие вкладыши 10. При этом с одной стороны магнитопровода идет чередование по окружности постоянных магнитов одной полярности и вкладышей, с другой стороны идет чередование по окружности магнитов другой полярности и вкладышей. Между этими кольцами имеется воздушный промежуток [104].

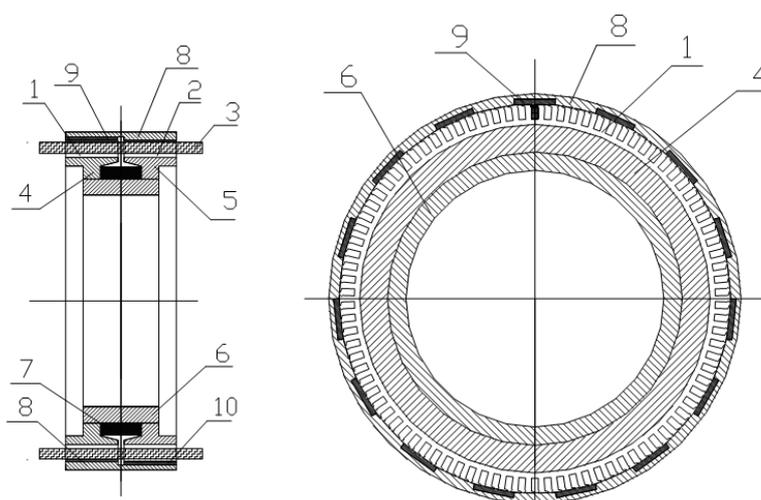


Рисунок 1.2.1 - Эскиз двигателя

Постоянные магниты, расположенные в первом кольце, сдвинуты по оси вращения относительно постоянных магнитов, расположенных во втором кольце на одно полюсное деление.

Принцип работы машины комбинированного возбуждения описанной конструкции следующий. Магнитопровод содержит два источника магнитного поля: постоянные магниты и обмотку возбуждения. Оба источника создают свои магнитные потоки, которые замыкаются по разным маршрутам.

Магнитный поток от постоянных магнитов замыкается по следующему пути: первый воздушный зазор, зубцовая зона первого пакета статора, спинка первого пакета статора, массивный магнитопровод, спинка второго пакета статора, зубцовая зона второго пакета статора, второй воздушный зазор, магнитопроводящий вкладыш второго кольца ротора, спинка ротора, магнитопроводящий вкладыш первого кольца ротора.

Магнитный поток от обмотки возбуждения замыкается по следующему пути: первый воздушный зазор, зубцовая зона первого пакета статора, спинка первого пакета статора, массивный магнитопровод, спинка второго пакета статора, зубцовая зона второго пакета статора, второй воздушный зазор, постоянный магнит намагниченности одной полярности второго кольца ротора, спинка ротора, постоянный магнит намагниченности противоположной полярности по второго кольца ротора.

Таким образом, магнитные потоки пересекаются только в спинке якоря и спинке индуктора, при этом магнитный поток от постоянных магнитов остается неизменным по величине и направлению, а магнитный поток от обмотки возбуждения может менять как величину, так и полярность. Таким образом, суммарный магнитный поток можно регулировать за счет обмотки возбуждения.

Оба магнитных потока при вращении ротора пересекают обмотку статора и наводят в ней ЭДС и токи. При взаимодействии тока якоря и результирующего магнитного потока от двух источников создается электромагнитный момент.



Рисунок 1.2.2 - Схема подключения обмоток

Схема подключения обмоток, показанная на рисунке 1.2.2, предполагает подключение обмотки возбуждения к мостовой схеме регулятора напряжения.

Данная конструкция позволяет с помощью регулирования потока от обмотки возбуждения обеспечить широкий диапазон регулирования скорости и момента ВЭКВ [104, 171].

Из уравнения Арнольда следует, что при повышении номинальной частоты вращения электродвигателя габариты машины уменьшаются при сохранении той же мощности [123]. Для увеличения номинальной скорости в мотор-колесо был встроен компактный понижающий планетарный редуктор с двухвенцовыми сателлитами с передаточным числом $N=10$.

Описанная конструкция принята в качестве базовой для разработки тягового электродвигателя для привода мотор-колес.

После выбора базового варианта трансмиссии и типа тягового двигателя требуется разработать математическую модель, предназначенную для оптимизации геометрии.

1.3 Разработка математической модели ВЭЖВ на основе схем замещения

Геометрия магнитной цепи представленной конструкции отличается от геометрии магнитной цепи традиционных вентильных машин. Эта специфика должна быть учтена в методике расчета.

Высококоэрцитивные магниты имеют большое магнитное сопротивление, соизмеримое с магнитным сопротивлением воздуха. По этой причине, создавая собственный магнитный поток, постоянные магниты не пропускают через себя внешние магнитные поля. Этим фактором объясняется то обстоятельство, что магнитные потоки от постоянных магнитов и обмотки возбуждения имеют свои маршруты. Соответственно, магнитный поток от постоянного магнита наводит ЭДС только в части проводника, расположенной под постоянным магнитом. В другой части проводника, расположенной под вкладышем, ЭДС наводится от обмотки возбуждения. Суммарная ЭДС определяется сложением ЭДС от постоянных магнитов и обмотки возбуждения.

При расчете магнитной цепи необходимо учитывать эту особенность. Требуется рассчитать две магнитных цепи со своими магнитными потоками.

На рисунке 1.3.1 показана магнитная цепь двигателя комбинированного возбуждения. На рисунке изображен режим работы двигателя, когда ЭДС от двух источников возбуждения складываются, так как магнитные потоки от постоянных магнитов и обмотки возбуждения наводят ЭДС в своих зонах якорной обмотки.

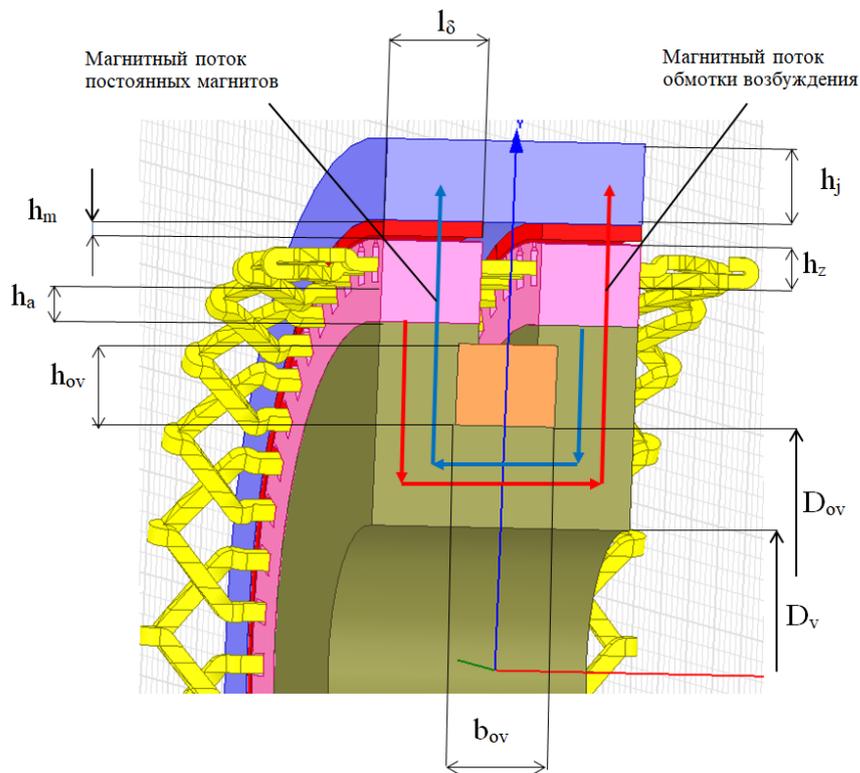


Рисунок 1.3.1 – Магнитная цепь ВЭКВ

В участках магнитной цепи, геометрия которых не отличается от геометрии стандартных машин, расчет ведется по известным традиционным методикам [3,7,61,65,80-82,147]. На участках магнитной цепи, которые отличаются от типовых конструкций, расчет необходимо вести по предлагаемой методике.

Все уравнения расчета необходимо свести в единую математическую модель. Далее эта математическая модель будет использована в оптимизационных циклах при выборе оптимальной геометрии по заданному критерию. По этой причине математическая модель должна быть достаточно проста и позволять проводить многократные расчеты при оптимизации.

Наиболее приемлемым методом для создания такой математической модели может быть метод схем замещения [123]. Он достаточно простой. Метод позволяет включить математическую модель в многочисленные циклы перебора при оптимизации. Погрешность расчета этим методом определяется точностью задания большого количества коэффициентов. Качество математической модели можно повысить, если значения этих коэффициентов определить более точным методом. Такой подход позволяет получить хорошие практические результаты.

Параметры, входящие в математическую модель, обычно подразделяют на входные и выходные.

Входные параметры можно разделить на следующие три группы.

1. Константы. В эту группу прежде всего необходимо включить параметры технического задания. Помимо традиционных (номинальной мощности, номинальной частоты вращения и номинального напряжения) исходными данными могут быть параметры, которые определяют специфику проектируемой электрической машины (быстродействие, надежность, габариты, марки используемых материалов).

2. Ограничения. В эту группу входят параметры, которые нельзя нарушать в процессе оптимального перебора. Они могут быть обусловлены технологией изготовления, например, минимальная и максимальная высота магнита, минимальная толщина зубца, минимальная спинка якоря. Также ограничения могут быть наложены и эксплуатационными условиями, например, максимальной температурой нагрева, обусловленной применением требуемого класса изоляции, максимально допустимой плотностью тока, обеспечением вибрационных и ударных нагрузок, важных для транспортного средства.

3. Независимые переменные. Это переменные, которые можно изменять независимо друг от друга. Как правило, это геометрические размеры, которые можно менять при поиске оптимального варианта. Независимые переменные действительно не должны влиять друг на друга, например, габаритные размеры, ширина зубца, высота магнита, расстояние между пакетами, окно под обмотку возбуждения.

Выходными параметрами математической модели, как правило, являются показатели качества проектируемого изделия. Они определяются конкретной проектной ситуацией. Это могут быть удельные энергетические параметры, масса, объем, стоимостные показатели.

1.4 Входные параметры

Для ВЭКВ в качестве входных параметров можно принять следующие величины:

1.4.1 Константы

- номинальная мощность на валу;
- частота вращения в номинальном режиме;
- фазное напряжение в номинальном режиме;
- число фаз;
- рабочий воздушный зазор;
- число зубцов, приходящихся на полюс и фазу;
- коэффициент заполнения медью обмотки якоря;
- параметры постоянного магнита.

Из приведенных параметров - часть может определить заказчик и указать их в техническом задании. Часть параметров определяется практикой проектирования и технологическими возможностями предприятия.

1.4.2 Ограничения

В предлагаемой математической модели имеются два типа ограничений. Часть ограничений связана с требуемой точностью расчета при применении метода последовательных приближений. Другая часть ограничений, как уже было отмечено, определяется технологическими возможностями предприятия:

- погрешность расчета коэффициента ЭДС;
- погрешность расчета КПД;
- технологический минимум высоты постоянного магнита;
- допустимая температура перегрева обмоток якоря и возбуждения;
- допустимая плотность тока в якорной обмотке;
- допустимая индукция в зубцовой зоне якоря;
- допустимая индукция в зоне спинки якоря;
- допустимая индукция в зоне спинки индуктора;
- допустимая индукция в торцах магнитопровода якоря.

Некоторые ограничения определены свойствами применяемых материалов, некоторые – технологическими возможностями оборудования.

1.4.3 Независимые переменные

Независимые переменные не должны влиять друг на друга и могут меняться произвольно. При проектировании типовых общепромышленных электрических машин электромагнитные нагрузки, как правило, задаются из практики большого количества спроектированных подобных машин. Именно они в основном определяют размеры активных частей и габариты. ВЭКВ не относится к типовым конструкциям. Наиболее приемлемые для них электромагнитные нагрузки не известны, по этой причине имеет смысл включить их в независимые переменные. При этом мы можем определить их оптимальные значения.

В качестве независимых переменных необходимо включить геометрические размеры, которые определяют поперечную и продольную геометрию ВЭКВ.

Примем следующие параметры для ВЭКВ в качестве независимых переменных:

- линейная якорная нагрузка;
- индукция в рабочем зазоре;
- число полюсов;
- диаметр расточки якоря;
- диаметр вала;
- ширина паза в среднем сечении;
- толщина магнита.

Параметры, которые в данный перечень не вошли, являются зависимыми и определяются в результате электромагнитного расчета.

1.4.4 Выходные параметры

Задача математической модели заключается в определении показателей, по которым можно судить о качестве выполненного проекта. В качестве таких показателей могут быть различные характеристики: экономические показатели, определяющие минимум использования дорогостоящих материалов и себестоимость в целом; энергетические показатели, такие как КПД, удельная мощность, удельный момент; массогабаритные показатели, такие как объем, масса, габариты изделия. Как правило, эти показатели находятся в противоречивой зависимости. При улучшении одного показателя ухудшается другой. Например,

увеличение КПД связано с уменьшением электромагнитных нагрузок и увеличением габаритов. Снижение себестоимости заставляет уменьшать количество активных материалов и тем самым повышать нагрев, увеличивать потери.

Идеальным вариантом было бы решение многокритериальной задачи, но она достаточно сложна в силу противоречивости критериев. Решение многокритериальной задачи целесообразно на этапе, когда проектируемая система хорошо изучена и можно с высокой достоверностью определить перечень критериев и их уровень. ВЭКВ представляет собой новую конструкцию, которая должна еще пройти свою эволюцию развития. Поэтому на данном этапе вполне разумно поставить решение более простой однокритериальной задачи оптимизации. При этом критериев может быть несколько, но при проектировании будет выбран один из них, и именно на его основе будет сформирована задача оптимизации. Выбор критерия оптимизации будет определяться конкретной проектной ситуацией.

Исходя из изложенного, в качестве критериев оптимальности в математическую модель включим следующие показатели:

- масса, которая относится к активным частям (суммарная масса меди, постоянных магнитов, железа магнитопровода). Для транспортного средства это важный показатель;
- масса постоянных магнитов;
- объем активных частей.

Практика показала востребованность этих показателей для различных проектных ситуаций.

1.5 Алгоритм электромагнитного расчета ВЭКВ

Как было отмечено выше, математическая модель должна быть достаточно простой. Это обусловлено тем, что расчетные формулы должны быть включены в большое количество оптимизационных циклов. Единственно приемлемой методикой в этом случае является метод схем замещения.

1. Начало расчета. Введение исходных данных и ограничений. Исходными данными являются параметры технического задания. Это, безусловно, номинальная мощность, частота вращения и напряжение. К ограничениям относятся технологические лимиты (минимальная ширина зубца, минимальная и максимальная высота магнита, максимально допустимый нагрев активных частей, плотности тока в обмотках).

2. Расчетная мощность, Вт

$$P_{\text{рас}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot k_e}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (1.4)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность двигателя, Вт; k_e – коэффициента ЭДС якоря; η – КПД электродвигателя; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности электродвигателя.

3. Проверка ограничений по габаритам.

Если диаметр расточки якоря задан, то расчет переходит к пункту 4. Если этого ограничения нет, то расчет переходит к блоку 5. Если задан наружный диаметр электродвигателя (ротора), то расчет расточки статора производится по пункту 6.

4. Суммарная длина пакетов якоря, м

$$L_{\delta} = \frac{\frac{60}{\pi^2} \cdot P_{\text{рас}}}{\alpha_{\delta} \cdot k_B \cdot k_{\text{обм}} \cdot A \cdot B_{\delta \text{ном}} \cdot D_{\text{я}}^2 \cdot n_{\text{ном}}}, \quad (1.5)$$

где α_{δ} – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; k_B – коэффициент формы поля; $k_{\text{обм}}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора; A – линейная нагрузка статора, А/м; $B_{\delta \text{ном}}$ – максимальное значение индукции в воздушном зазоре, Тл; $D_{\text{я}}$ – диаметр расточки якоря, м; $n_{\text{ном}}$ – номинальная скорость электродвигателя, об/мин.

5. Диаметр расточки якоря, м

$$D_{\text{я}} = \sqrt{\frac{60 P_{\text{рас}}}{\pi^2 \cdot \alpha_{\delta} \cdot k_B \cdot k_{\text{обм}} \cdot A \cdot B_{\delta \text{ном}} \cdot L_{\delta} \cdot n_{\text{ном}}}}. \quad (1.6)$$

6. Расчет геометрии, тока, напряжения и обмоточных данных.

Наружный диаметр якоря, м. Используется при заданном наружном диаметре.

$$D_{\text{я}} = D_{\text{ротор}} - 2 \cdot (h_{\text{спинки_ротора}} + h_{\text{маг}} + \delta), \quad (1.7)$$

где $D_{\text{ротор}}$ – наружный диаметр ротора, м; $h_{\text{спинки_ротора}}$ – высота спинки ротора, м; $h_{\text{маг}}$ – высота магнита, м; δ – воздушный зазор между статором и ротором, м.

Полусное деление, м

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{\text{я}}}{2 \cdot p}, \quad (1.8)$$

где p – количество пар полюсов электродвигателя.

Полная длина машины, м

$$L_{\delta\text{полная}} = L_{\delta} + L_{\text{между_пакетами}}, \quad (1.9)$$

где $L_{\text{между_пакетами}}$ – расстояние между пакетами якоря, обеспечивающее минимальное рассеивание магнитного потока, м.

Фазное напряжение, В

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{2} \cdot k_d}, \quad (1.10)$$

где $U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение питания (на клеммах АКБ), В; k_d – отношение амплитуды выпрямленного напряжения к амплитудному значению фазного напряжения.

Номинальный ток, А

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\phi} \cdot \eta}. \quad (1.11)$$

Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = \frac{Z}{m \cdot 2 \cdot p}, \quad (1.12)$$

где Z – число пазов на статоре; m – число фаз.

Число проводников в пазе

$$u_{\text{п}} = \frac{\pi \cdot a \cdot D_{\text{я}} \cdot A}{Z \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot \frac{2}{3}}, \quad (1.13)$$

где a – число параллельных ветвей.

Линейная нагрузка, А/м

$$A = \frac{Z \cdot u_{\text{п}} \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot \frac{2}{3}}{\pi \cdot a \cdot D_{\text{я}}}. \quad (1.14)$$

Зубцовое деление, м

$$t_{Z1} = \frac{\pi \cdot D_{\text{я}}}{Z}. \quad (1.15)$$

Площадь сечения эффективного проводника, м² (рис.1.5.1)

$$q_{\text{эф}} = \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{эф}}}{2}\right)^2, \quad (1.16)$$

где $d_{\text{эф}}$ – диаметр эффективного проводника.

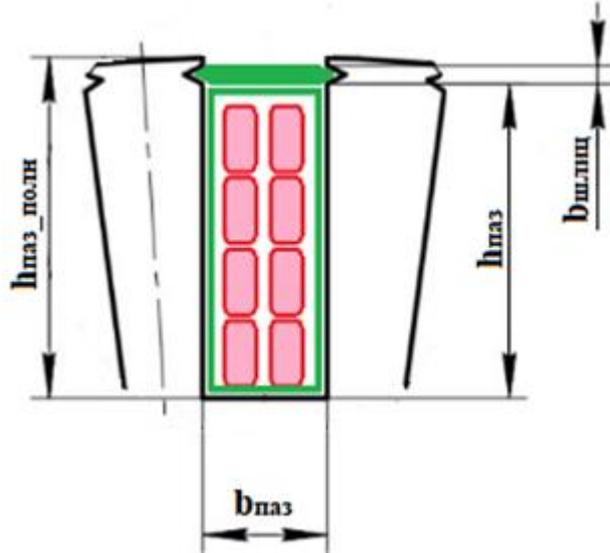


Рисунок 1.5.1 – Эскиз паза

Плотность тока, А/м²

$$J_1 = \frac{I_{\text{ном}}}{a \cdot q_{\text{эф}}}. \quad (1.17)$$

Индукция в верхней части зубца, Тл

$$B_{Z\text{верх}} = \frac{B_{\delta\text{ном}} \cdot t_{Z1} \cdot L_{\delta}}{(t_{Z1} - b_{\text{паз}}) \cdot L_{\delta} \cdot k_c}, \quad (1.18)$$

где $b_{\text{паз}}$ – ширина паза, м.

Зубцовое деление на дне паза, м

$$t_{Z\text{дно_паз}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{я}} - h_{\text{паз_полн}} \cdot 2)}{Z}, \quad (1.19)$$

где $h_{\text{паз_полн}}$ – полная высота паза, м.

Индукция в нижней части зубца, Тл

$$B_{Z\text{дно}} = \frac{B_{\delta\text{ном}} \cdot t_{Z1} \cdot L_{\delta}}{(t_{Z\text{дно_паз}} - b_{\text{паз}}) \cdot L_{\delta} \cdot k_c}, \quad (1.20)$$

где k_c – коэффициент заполнения пакетов якоря сталью.

Количество витков

$$w_1 = \frac{2 \cdot p \cdot q_1 \cdot u_{\text{п}}}{2 \cdot a}. \quad (1.21)$$

Обмоточный коэффициент

$$k_{об} = k_y \cdot k_p \cdot k_{ск}. \quad (1.22)$$

где k_y – коэффициент укорочения; k_p – коэффициент распределения; $k_{ск}$ – коэффициент скоса.

7. Проверка линейной нагрузки.

Если линейная нагрузка находится в допустимом диапазоне, определяемом нагревом, то происходит переход к пункту 9.

В противном случае в пункте 8 корректируются основные размеры, и расчет циклами повторяется с пункта 3.

8. Корректировка активных размеров и обмоточных данных. Переход к пункту 3.

9. Проверка плотности тока в якорной обмотке.

Если плотность тока не превышает ранее заданную (допустимую), то расчет переходит к пункту 10.

Если происходит превышение предела, то происходит переход к пункту 8.

10. Расчет магнитной цепи.

Магнитный поток, Вб

$$\Phi = a_\delta \cdot B_{\delta ном} \cdot \tau \cdot L_\delta. \quad (1.23)$$

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = \frac{t_{Z1} + 10 \cdot \delta}{t_{Z1} - b_{паз} + 10 \cdot \delta}. \quad (1.24)$$

МДС воздушного зазора, А

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\delta ном} \cdot \delta \cdot k_\delta, \quad (1.25)$$

где $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ – удельная магнитная проводимость вакуума, Гн/м.

Зубцовое деление на середине паза, м

$$t_{Z \text{середина_паза}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{статор}} - h_{\text{паз_полн}})}{Z}. \quad (1.26)$$

Индукция в средней части зубца, Тл

$$B_{Z \text{середина_паза}} = \frac{B_{\delta ном} \cdot t_{Z1} \cdot L_\delta}{(t_{Z \text{середина_паза}} - b_{\text{паз}}) \cdot L_\delta \cdot k_c}. \quad (1.27)$$

МДС зубцовой зоны, А

$$F_Z = 2 \cdot H_{Z \text{середина_паза}} \cdot h_{\text{паз_полн}}, \quad (1.28)$$

где $H_{Z_{\text{середина_паза}}}$ – напряженность магнитного поля в средней части зубца, А/м.

Высота спинки якоря, м

$$h_a = h_{\text{паз_полн}} \cdot k_{\text{спинки}}, \quad (1.29)$$

где $k_{\text{спинки}}$ – коэффициент спинки якоря.

Ширина спинки якоря на один зубец, м

$$b_a = \frac{\pi \cdot (D_{\text{я}} - 2 \cdot (h_{\text{паз_полн}} + h_a))}{Z}, \quad (1.30)$$

где h_a – высота спинки якоря.

Индукция в спинке якоря, Тл

$$B_a = \frac{B_{\delta_{\text{ном}}} \cdot t_{Z1} \cdot L_{\delta}}{(t_{Z_{\text{дно_паз}}} - b_a) \cdot L_{\delta} \cdot k_c} \quad (1.31)$$

МДС спинки статора (сталь 2212), А

$$F_a = 2 \cdot H_a \cdot h_a. \quad (1.32)$$

Ширина стенки якоря (от торцевой поверхности якоря до обмотки возбуждения), м

$$b_{\text{стенки}} = \frac{\pi \cdot (D_{\text{я}} - 2 \cdot (h_{\text{паз_полн}} + h_a) - h_{\text{ОВ}})}{Z}, \quad (1.33)$$

где $h_{\text{ОВ}}$ – высота катушки обмотки возбуждения.

Индукция в стенке якоря, Тл

$$B_{\text{стенки}} = \frac{B_{\delta_{\text{ном}}} \cdot t_{Z1} \cdot \frac{L_{\delta}}{2}}{b_{\text{стенки}} \cdot \left(\frac{L_{\delta} \cdot b_{\text{ОВ}}}{2}\right)}, \quad (1.34)$$

где $b_{\text{ОВ}}$ – ширина катушки обмотки возбуждения.

МДС стенки якоря на пару полюсов (сталь 10)

$$F_{\text{стенки}} = 2 \cdot H_{\text{стенки}} \cdot h_{\text{ОВ}}, \quad (1.35)$$

где $H_{\text{стенки}}$ – напряженность магнитного поля в стенке якоря, А/м.

Наружный радиус трубы якоря, м

$$r_{\text{наруж_труб_я}} = \frac{D_{\text{я}} - 2 \cdot (h_{\text{паз_полн}} + h_a + h_{\text{ОВ}})}{2}. \quad (1.36)$$

Внутренний радиус трубы якоря, м

$$r_{\text{внутр_труб_я}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot r_{\text{наруж_труб_статора}}^2 - \left(\frac{\Phi \cdot p}{B_{\text{труб_статора}}}\right)}{\pi}}, \quad (1.37)$$

где $B_{\text{труб_статора}}$ – требуемая индукция в трубе якоря, задаваемая исходя из свойств материала, Тл.

МДС трубы якоря на пару полюсов (сталь 10), А

$$F_{\text{труб_я}} = L_{\text{полная}} \cdot H_{\text{труб_я}}, \quad (1.38)$$

где $H_{\text{труб_я}}$ – напряженность магнитного поля в трубе якоря, А/м.

Индукция в сердечнике полюса, Тл

$$B_c = B_{\text{ном}}. \quad (1.39)$$

МДС сердечника полюса на пару полюсов (сталь 10), А

$$F_c = 2 \cdot H_c \cdot h_{\text{маг}}, \quad (1.40)$$

где H_c – напряженность магнитного поля в сердечнике полюса, А/м.

Площадь сечения трубы ротора, м²

$$S_{\text{труб_рот}} = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{рот}}}{2}\right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{рот}} - 2 \cdot h_{\text{спинки_рот}}}{2}\right)^2. \quad (1.41)$$

Индукция в трубе ротора, Тл

$$B_{\text{труб_рот}} = \frac{\Phi \cdot p}{S_{\text{труб_рот}}}. \quad (1.42)$$

МДС ярма ротора (сталь 10), А

$$F_{\text{труб_рот}} = L_{\text{полная}} \cdot H_{\text{труб_рот}}. \quad (1.43)$$

где $H_{\text{труб_рот}}$ – напряженность магнитного поля в трубе ротора, А/м.

Суммарная МДС, А

$$\sum F = F_{\delta} + F_Z + F_a + F_{\text{стенки}} + F_{\text{труб_я}} + F_m + F_{\text{труб_рот}}. \quad (1.44)$$

11. По результатам расчета магнитной цепи определяется коэффициент насыщения

$$k_{\mu} = \frac{\sum F}{F_{\delta}}. \quad (1.45)$$

12. Сравнивается расчетный коэффициент насыщения с первоначально заданным.

Если разница не превышает допустимый предел, расчет переходит к пункту 14. В противном случае коэффициент насыщения усредняется в пункте 13, и расчет повторяется циклами с пункта 8. Реализуется метод последовательных приближений.

13. Уточнение коэффициента насыщения.

14. Расчет обмотки возбуждения.

Диаметр средней катушки обмотки возбуждения, м

$$D_{\text{ср}} = D_{\text{я}} - 2 \cdot (h_{\text{паз_полн}} + h_a) - h_{\text{ОВ}}. \quad (1.46)$$

Средняя длина витка ОВ, м

$$L_{\text{срОВ}} = \pi \cdot D_{\text{ср}}. \quad (1.47)$$

Удельное сопротивление меди при 75 °С, Ом•м

$$\rho_{75^\circ} = \rho_{20^\circ} \cdot (1 + 0,004 \cdot (t_{\text{ОВ}} - 20)), \quad (1.48)$$

где ρ_{20° – удельное сопротивление меди при 20 °С, Ом•м; $t_{\text{ОВ}}$ – рабочая температура обмотки возбуждения, °С.

Напряжение питания обмотки возбуждения, В

$$U_{\text{питанияОВ}} = \frac{U_{\Phi}}{2}. \quad (1.49)$$

Площадь поперечного сечения проводника обмотки возбуждения, м²

$$q_{\text{ОВ}} = \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{ОВ}}}{2}\right)^2, \quad (1.50)$$

где $d_{\text{ОВ}}$ – диаметр провода обмотки возбуждения, м.

Фактическое активное сопротивление обмотки возбуждения, Ом

$$r_{f\text{ОВ}} = \frac{\rho_{75^\circ} \cdot L_{\text{срОВ}} \cdot w_{\text{ОВ}}}{q_{\text{ОВ}}}, \quad (1.51)$$

где $w_{\text{ОВ}}$ – количество витков обмотки возбуждения.

Ток обмотки возбуждения, А

$$I_{\text{ОВ}} = \frac{U_{\text{питанияОВ}} \cdot \sqrt{3}}{r_{f\text{ОВ}}}. \quad (1.52)$$

Плотность тока обмотки возбуждения, А/м²

$$J_{\text{ОВ}} = \frac{I_{\text{ОВ}}}{q_{\text{ОВ}}}. \quad (1.53)$$

Суммарная МДС обмотки возбуждения, А

$$\sum F_{\text{ОВ}} = \frac{I_{\text{ОВ}} \cdot w_{\text{ОВ}}}{2}. \quad (1.54)$$

15. Сравнивается плотность тока в обмотке возбуждения с допустимой.

Если плотность тока не превышает предел, то расчет переходит к пункту 17. Если произошло превышение предела, то в пункте 16 корректируется площадь поперечного сечения окна ОВ и расчет циклами повторяется, начиная с пункта 14.

16. Корректировка площади поперечного сечения окна под обмотку возбуждения.

17. Параметры обмотки якоря с учетом уточненной геометрии

Длина лобовой части обмотки якоря, м

$$L_{\text{лоб}} = 1.7 \cdot (D_{\text{я}} - h_{\text{паз_полн}}) \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot p}\right). \quad (1.55)$$

Средняя длина витка обмотки якоря, м

$$L_{\text{ср}} = 2 \cdot (L_{\text{лоб}} + L_{\text{д\полная}}). \quad (1.56)$$

Сопротивление обмотки якоря при 75 градусах

$$r_{a75} = \rho_{75^\circ} \cdot L_{\text{ср}} \cdot \frac{W_{\text{ОВ}}}{q_{\text{эф}} \cdot a}. \quad (1.57)$$

18. Расчет синхронных индуктивных сопротивлений обмотки якоря по продольной и поперечной оси, сопротивления рассеяния, определение результирующей ЭДС в обмотке якоря.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря, Ом

$$x_{\sigma} = 0.158 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{L_{\delta}}{pq_1} (\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{п}}), \quad (1.58)$$

где $\lambda_{\text{п}}, \lambda_{\text{п}}, \lambda_{\text{п}}$ – удельные проводимости пазового, дифференциального и лобового рассеяния; f – частота питающего напряжения, В.

Сопротивление реакции якоря по продольной и поперечной осям с учетом насыщения для полюсов, которые являются магнитопроводящими, можно определить по традиционной методике [123].

Сопротивление реакции якоря по продольной оси, Ом

$$x_{ad} = 4mf \frac{\mu_0 \tau L_{\delta}}{\pi k_{\delta} k_{\mu d} \delta} \cdot \frac{W_1^2 k_{\text{об}}^2}{p} k_{ad}. \quad (1.59)$$

Сопротивление реакции якоря по поперечной оси, Ом

$$x_{aq} = 4mf \frac{\mu_0 \tau L_\delta}{\pi k_\delta k_{\mu q} \delta} \cdot \frac{W_1^2 k_{\sigma 0}^2}{p} k_{aq}, \quad (1.60)$$

где $k_{\mu d}, k_{\mu q}$ – коэффициенты насыщения магнитной цепи якоря по продольной и поперечной осям; k_{ad}, k_{aq} – коэффициенты приведения по продольной и поперечной осям.

Угол сдвига фаз между вектором ЭДС возбуждения и током якоря, эл. гр. [123]

$$\psi = \arctg \left(\frac{U_\phi \cdot \sin \varphi - I_{\text{НОМ}} \cdot x_\sigma - I_{\text{НОМ}} \cdot x_{ad}}{U_\phi \cdot \sin \varphi - I_{\text{НОМ}} \cdot r_{a75}} \right). \quad (1.61)$$

ЭДС от постоянного магнита, В

$$E_f = \frac{U_\phi \cdot \cos \varphi + I_{\text{НОМ}} \cdot r_{a75}}{\cos \psi}. \quad (1.62)$$

Результирующая ЭДС в обмотке якоря при номинальной нагрузке, В

$$E_\delta = \sqrt{(E_f - I_{\text{НОМ}} \cdot x_{ad} \cdot \cos \psi)^2 + (I_{\text{НОМ}} \cdot x_{aq} \cdot \sin \psi)^2}. \quad (1.63)$$

19. Определение коэффициента ЭДС якоря:

$$k_e = \frac{E_\delta}{U}. \quad (1.64)$$

20. Определение погрешности расчета коэффициента ЭДС:

$$\varepsilon_{ke} = \frac{|k_e - k_{e\text{пред}}|}{k_e}. \quad (1.65)$$

где $k_{e\text{пред}}$ – значение k_e на предыдущем цикле.

21. Уточнение коэффициента ЭДС. Повторение цикла, начиная с пункта 2.

22. Определение точности расчета коэффициента ЭДС. Если точность расчета удовлетворительная, расчет переходит к пункту 23. В противном случае расчет циклами повторяется, начиная с пункта 21.

23. Расчет массы активных материалов.

Масса зубцов статора, кг

$$m_z = 7800 \cdot L_\delta \cdot k_c \cdot h_{\text{паз_полн}} \cdot (t_{z\text{середина_паза}} - b_{\text{паз}}) \cdot Z. \quad (1.66)$$

Масса ярма статора

$$m_a = 7800 \cdot L_\delta \cdot k_c \cdot \left\{ \pi \cdot \left[\left(\frac{D_{я-2} \cdot h_{паз_полн}}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{я-2} \cdot (h_{паз_полн} + h_a)}{2} \right)^2 \right] \right\}. \quad (1.67)$$

Масса меди обмотки статора, кг

$$m_{cu} = 8900 \cdot q_{эф} \cdot u_{п} \cdot Z \cdot \frac{L_{ср}}{2}. \quad (1.68)$$

Масса меди обмотки возбуждения, кг

$$m_{ОВ} = 8900 \cdot q_{ОВ} \cdot w_{ОВ} \cdot L_{срОВ}. \quad (1.69)$$

Масса стали трубы статора, кг

$$m_j = 7800 \cdot L_{\delta\text{полная}} \cdot S_{\text{труб_статор}}, \quad (1.70)$$

где $S_{\text{труб_статор}}$ – площадь сечения трубы статора.

Масса трубы ротора, кг

$$m_r = 7800 \cdot L_{\delta\text{полная}} \cdot S_{\text{труб_рот}}. \quad (1.71)$$

Масса магнитов, кг

$$m_{\text{маг}} = 7800 \cdot L_\delta \cdot \left\{ \pi \cdot \left[\left(\frac{D_{рот-2} \cdot h_{спинки_рот}}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{статор-2} \cdot (h_{спинки_рот} + h_{\text{маг}})}{2} \right)^2 \right] \right\}. \quad (1.72)$$

Полная масса активных материалов, кг

$$\sum m = m_Z + m_a + m_{cu} + m_{ОВ} + m_j + m_r + m_{\text{маг}} \quad (1.73)$$

24. Расчет потерь.

Электрические потери в обмотке якоря, Вт

$$P_{эл} = I_{\text{ном}}^2 \cdot r_{a75} \cdot (m - 1). \quad (1.74)$$

Электрические потери в обмотке возбуждения, Вт

$$P_{ОВ} = I_{ОВ}^2 \cdot r_{fОВ}. \quad (1.75)$$

Магнитные потери в зубцах, Вт

$$P_Z = k_{дз} \cdot \rho_{50} \cdot B_{Z\text{середина_паза}}^2 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} \cdot m_Z, \quad (1.76)$$

где ρ_{50} – удельные потери; $k_{дз}$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в зубцовой зоне из-за частичного замыкания листов.

Магнитные потери в спинке якоря, Вт

$$P_a = k_{да} \cdot \rho_{50} \cdot B_a^2 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} \cdot m_a, \quad (1.77)$$

где $k_{да}$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в спинке якоря из-за частичного замыкания листов.

Добавочные потери, Вт

$$P_{доб} = 0,005 \cdot U_{ном} \cdot I_{ном}. \quad (1.78)$$

Суммарные потери, Вт

$$\sum P = P_{эл} + P_{ОВ} + P_Z + P_a + P_{мех} + P_{доб}. \quad (1.79)$$

25. Расчет коэффициента полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{U_{ном} \cdot I_{ном} \cdot (m-1) \cdot \cos\varphi}. \quad (1.80)$$

26. Расчет погрешности определения.

27. Усреднение КПД. Повторение цикла, начиная с пункта 2.

28. Сравнение точности расчета КПД с первоначально заданным значением.

Если КПД рассчитан достаточно точно, то расчет переходит к блоку 29. Если погрешность определения КПД превышает допустимый предел, расчет повторяется, начиная с блока 2, реализуя метод последовательных приближений.

29. Определение основных параметров двигателя.

Полезная мощность на валу, Вт

$$P_{ном} = P_{потребляемая} - \sum P, \quad (1.81)$$

где $P_{потребляемая}$ – потребляемая мощность электродвигателя.

Номинальная скорость, об/мин

$$n_{ном} = \frac{(U_{\phi} - I_{ном} \cdot r_{a75}) \cdot 60}{4,44 \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot k_{об} \cdot p}. \quad (1.82)$$

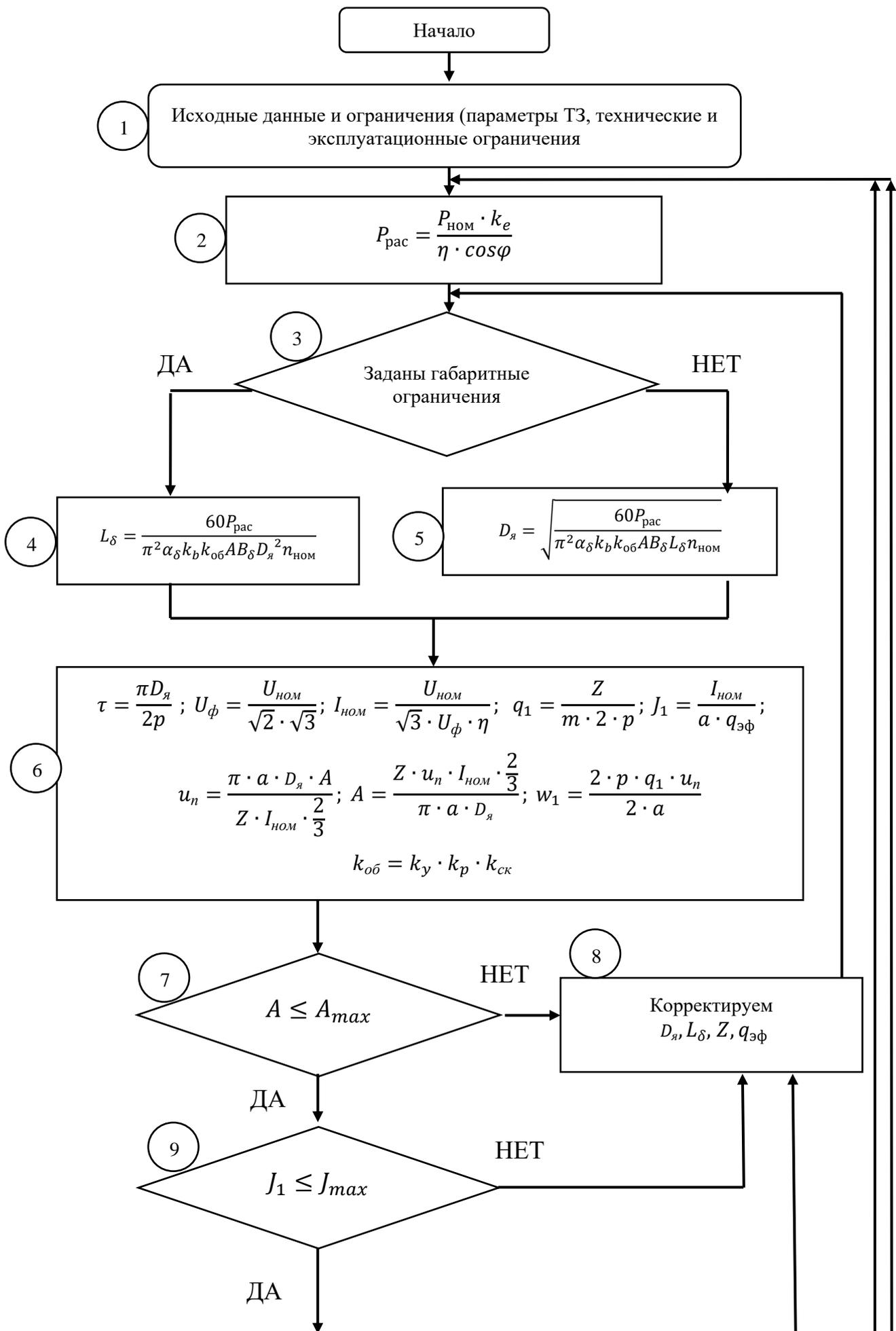
Номинальный момент, Н•м

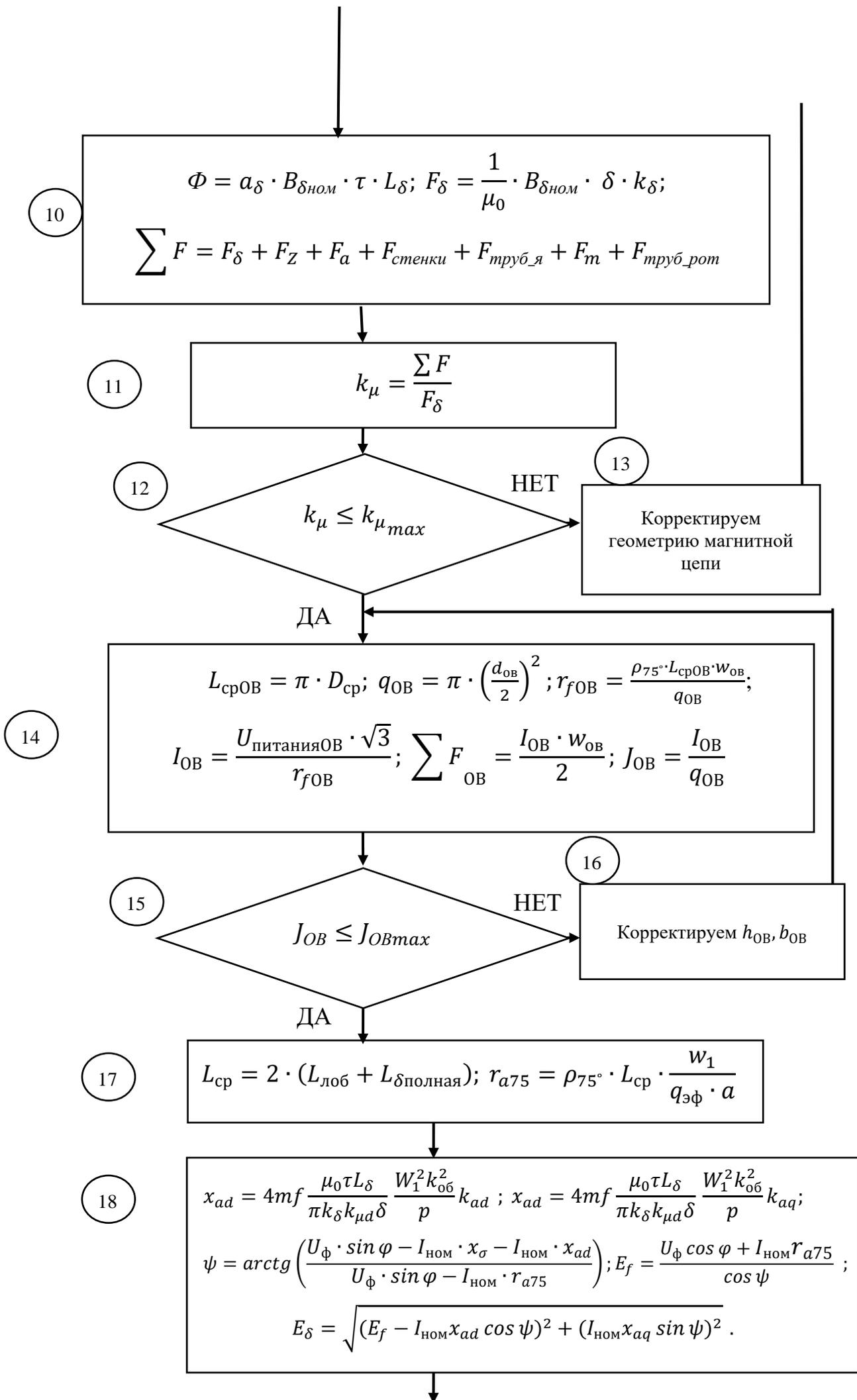
$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{ном}}{60}}. \quad (1.83)$$

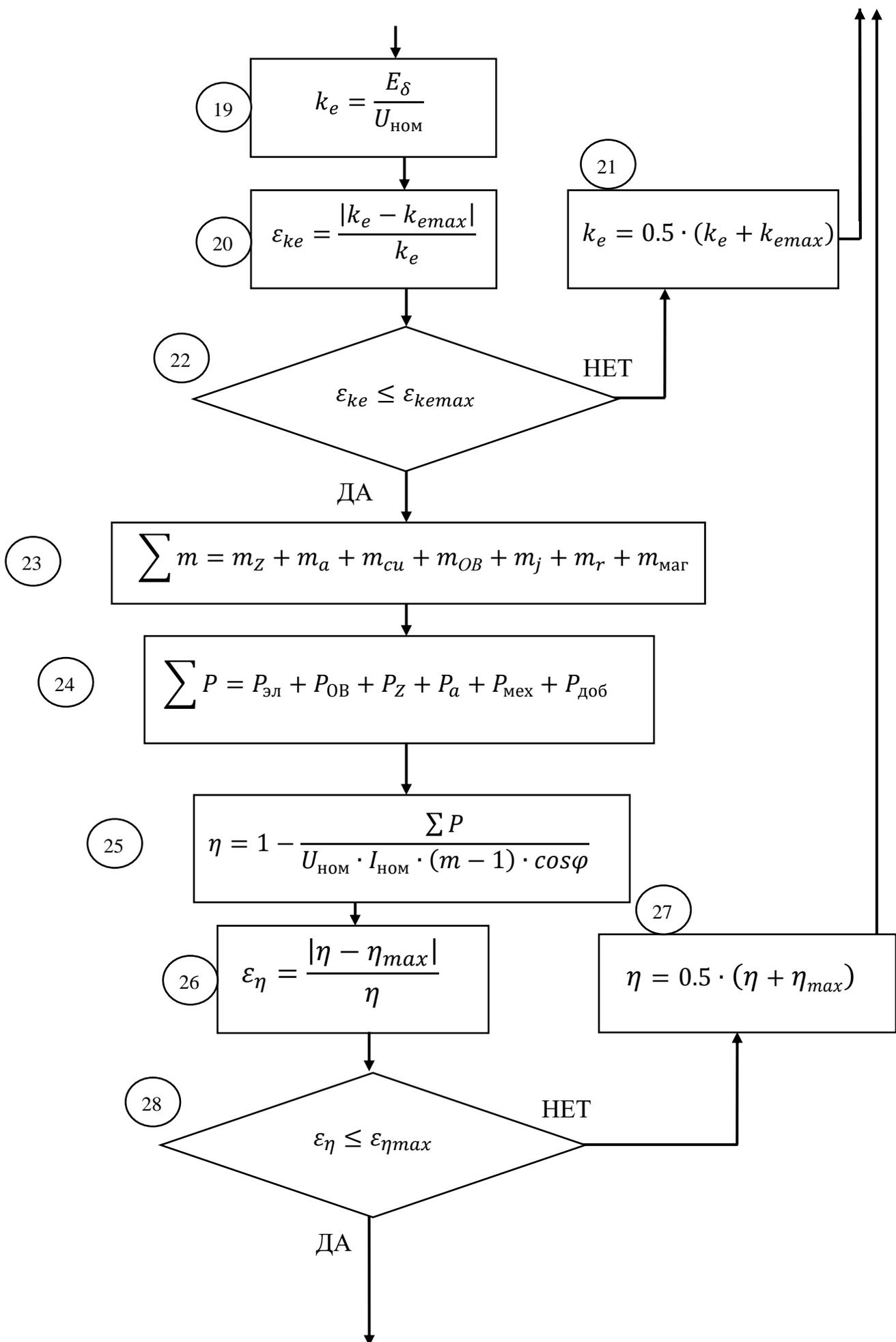
Завершение расчета.

1.6 Блок-схема алгоритма расчета ВЭКВ

Блок-схема данного алгоритма, дающая более наглядное представление о математической модели расчета, показана на рисунке. 1.6.1.







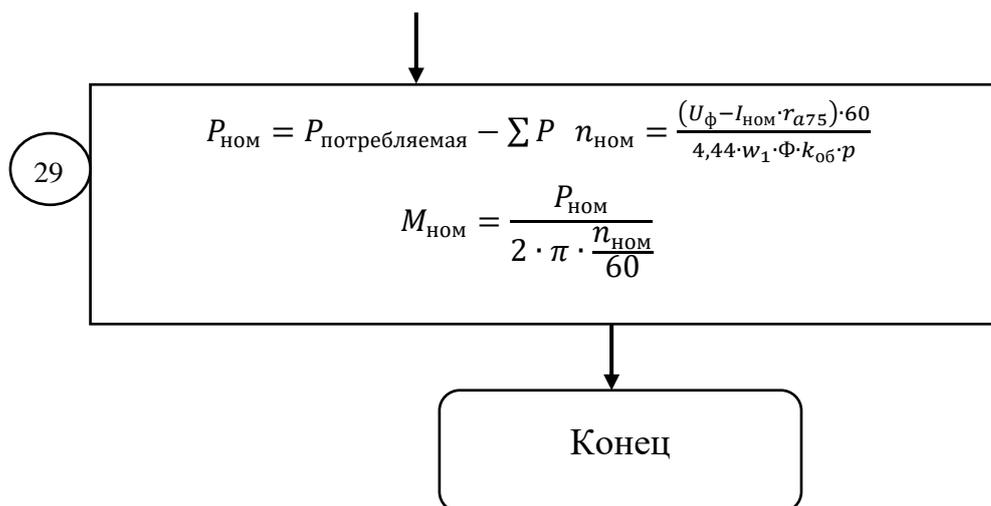


Рисунок 1.6.1 – Блок-схема алгоритма расчета ВЭВД

По данному алгоритму был составлен программный код с применением языка программирования Delphi, которая была включена в подсистему синтеза проектной системы ВЭКВ.

1.7 Результаты работы математической модели расчета ВЭКВ

Представленные уравнения содержат все взаимосвязи между геометрией и характеристиками двигателя. Они могут служить основой для создания инженерной методики проектирования ВЭКВ. Проверим достоверность и точность математической модели расчета ВЭКВ на проекте мотор-колеса для гоночного электроболида. Вентильный электродвигатель для мотор-колеса имеет следующие основные параметры:

- номинальная мощность 30 кВт;
- номинальное напряжение питания 72 В;
- максимальные обороты 16000 об/мин.

При использовании разработанной математической модели были получены следующие характеристики электродвигателя, представленные ниже (рисунки 1.7.1-1.7.5). Проверка математической модели была сделана в программной среде Mathcad.

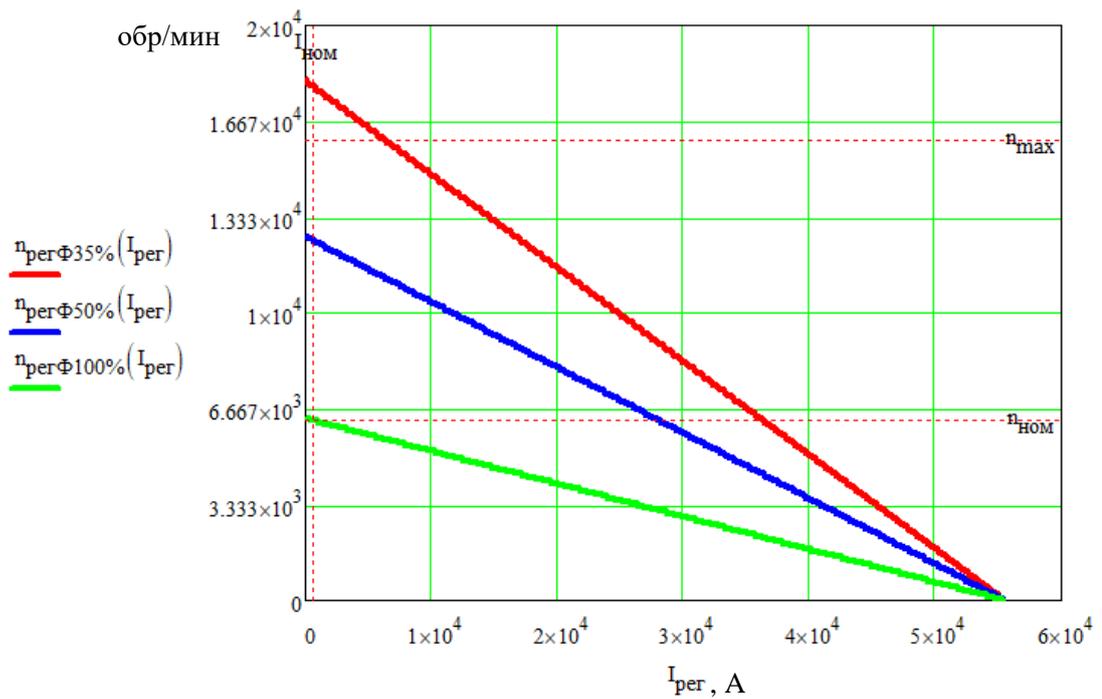


Рисунок 1.7.1 - Зависимость скорости от тока якоря при разных потоках (токах) возбуждения в диапазоне от короткого замыкания до холостого хода

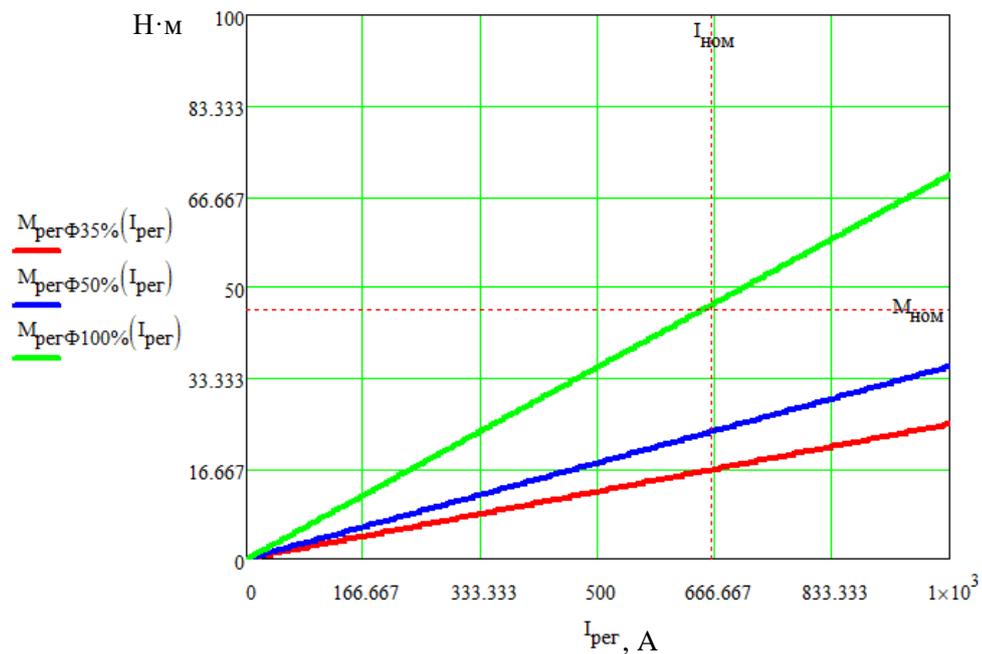


Рисунок 1.7.2 - Зависимость момента на валу ЭД от тока якоря при разных потоках (токах) возбуждения в диапазоне от короткого замыкания до холостого хода

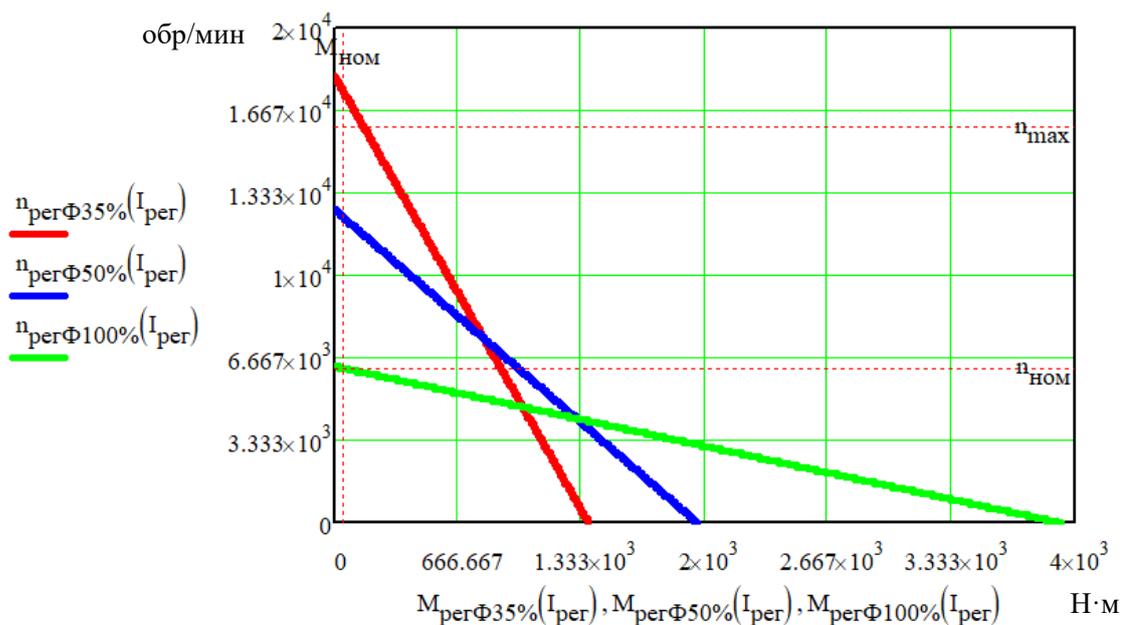


Рисунок 1.7.3 - Зависимость скорости от момента (механическая характеристика) при разных потоках (токах) возбуждения в диапазоне от короткого замыкания до холостого хода

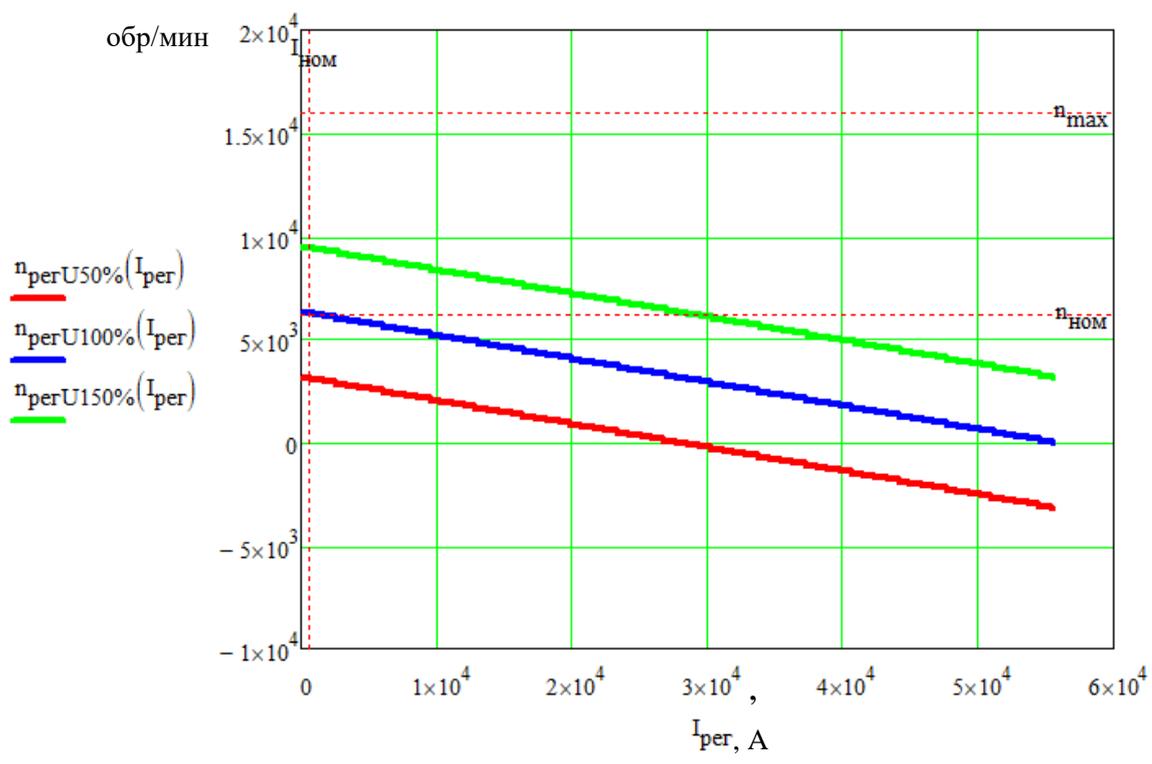


Рисунок 1.7.4 - Зависимость скорости от тока якоря при разных напряжениях питания

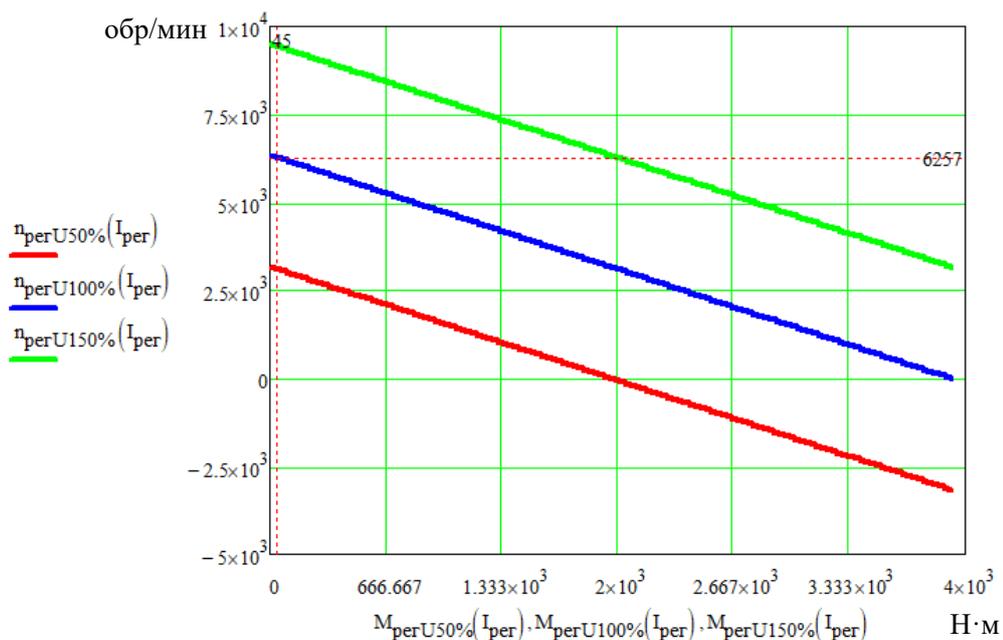


Рисунок 1.7.5 - Зависимость скорости от момента (механическая характеристика) при разных напряжениях питания

Особенность ВЭКВ заключается в том, что управлять им можно одновременно по двум каналам: по цепи якоря и по цепи возбуждения. Поэтому представляют интерес зависимости для двухмерной функции. В декартовой системе координат эти зависимости будут иметь форму поверхностей. На рисунке 1.7.6 представлена поверхность зависимости момента от потока (тока возбуждения) и тока якоря.

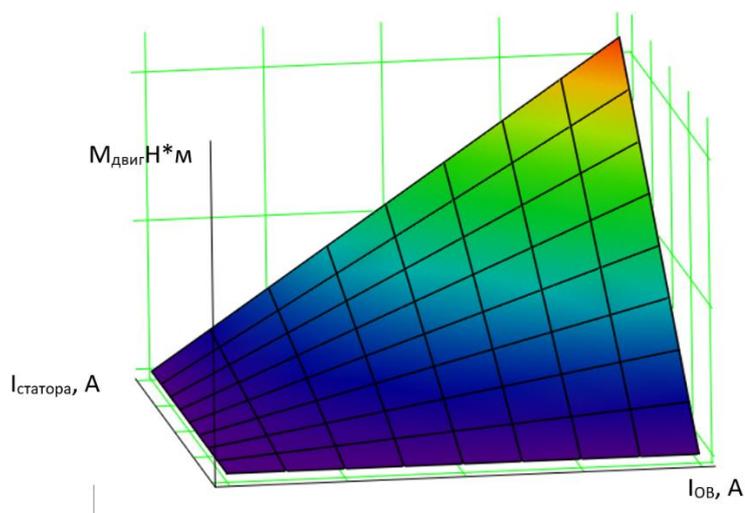


Рисунок 1.7.6 - Зависимости момента от потока (тока) возбуждения и тока якоря

Данная зависимость показывает, что требуемый момент можно получить по двум координатам, при этом энергетически выгодно в большей степени использовать координату по цепи возбуждения, чем по цепи якоря.

Данные графики показывают корректность работы математической модели. Приведенные кривые по форме не противоречат теоретическим кривым для электродвигателя этого класса.

Выводы по главе 1

1. На основе проведенного анализа существующих типов трансмиссий и тяговых электродвигателей в качестве базового был выбран вариант мотор-колеса с встроенным вентильным двигателем комбинированного возбуждения и планетарным редуктором с двухвенцовыми сателлитами. Данное решение позволило сократить массу и габариты электротрансмиссии, разместив ее в объеме диска колеса.

2. Разработана методика и математическая модель анализа ВЭКВ на основе метода схем замещения. Данная модель предназначена для дальнейшего включения ее в оптимизационные циклы для определения геометрии основных активных компонентов.

3. Приведена блок-схема алгоритма расчета по математической модели. Блок-схема реализована в программной среде Delphi и включена в подсистему синтеза проектной системы. Данная модель позволяет сократить время расчета при сохранении точности определения основных параметров до 3-5 %.

4. Достоверность математической модели и полученного семейства характеристик для ВЭКВ мотор-колеса подтверждены в ходе разработки модели анализа на основе метода конечных элементов и проведения натурных испытаний ВЭКВ.

2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЭКВ

Вводные замечания.

При разработке проектной системы должно быть определено основное направление ее развития. Анализ эволюции САД и САЕ систем показывает, что они развиваются в направлении, так называемых сквозных технологий. Сквозные технологии связаны с исключением из технологического цикла документации на бумажных носителях. При существующих технологиях проектирования новых изделий каждый этап заканчивается разработкой альбомов конструкторской, технологической, эксплуатационной, ремонтной документации. Вся документация оформляется на бумажных носителях. Сквозные технологии исключают бумагу из делопроизводства. Разработчик в проектной системе делает весь комплекс необходимых расчетов, решая при этом связанные задачи. Далее он передает электронную модель конструктору, который ее дорабатывает в части применения требуемых комплектующих, габаритных и установочных размеров. Далее технолог работает с этой электронной моделью с точки зрения ее производства на имеющемся оборудовании. По технологической цепочке модель разбирается на детали и формируются команды для программируемых станков с целью изготовления основных деталей и сборок. Сквозная технология исключает дополнительные звенья согласования, повышается качество технологического процесса, ускоряются стадии от идеи до серийного производства. Понятно, что такая сложная технология будет реализована на будущих перспективных предприятиях, но уже сейчас вновь создаваемые проектные системы должны учитывать эти тенденции при формировании своей структуры.

Определим основные требования к разрабатываемой проектной системе ВЭКВ с ориентацией ее на сквозные технологии.

2.1 Требования, предъявляемые к математической модели

Основным требованием, предъявляемым к математической модели, является гибкость. Гибкость математической модели означает, что она должна включать в себя как можно больше конструктивных исполнений и модификаций. Она должна позволять закладывать в расчет различные материалы, учитывать различные режимы работы. В данном проекте в математическую модель заложена только обращенная конструкция, но модульный принцип построения позволяет в дальнейшем включить в нее нормальную конструкцию. Такую возможность следует оставить на перспективу.

2.2 Требования, предъявляемые к системе оптимизации

Выше было отмечено, что проектная система будет строиться на основе однокритериальной оптимизации. При этом в зависимости от проектной ситуации можно будет выбрать различные критерии для конкретного проекта. В оптимальном проектировании существует понятие многоуровневой оптимизации. Оно означает следующее. Допустим, имеется однокритериальная система оптимизации с несколькими варьируемыми переменными. При переборе всех переменных мы имеем полную габаритную оптимизацию. В зависимости от требований проекта одна из переменных может быть зафиксирована, например, для мотор-колеса это может быть наружный диаметр, ограниченный ободом. В этом случае структура оптимизации может сломаться и не работать, так как фиксация одной переменной потребует перестройки математической модели. Таким образом, многоуровневая оптимизация позволяет фиксировать от одной, до нескольких независимых переменных без перестройки математической модели. При этом мы будем получать различные уровни оптимизационной задачи. При фиксации всех независимых переменных мы будем иметь поверочный расчет двигателя, который вписывается в систему оптимизации на самый низший уровень. В проектной деятельности приходилось сталкиваться со следующими ситуациями. Заказчик ставил задачу использовать закупленную им партию постоянных магнитов, которую он хочет использовать в производстве. Менять размеры и форму магнитов нельзя, а остальную геометрию можно. Часто возникают задачи, когда заказчик не

хочет изменять хорошо отработанный технологами индуктор при возможности изменения якоря или наоборот. Типичной является ситуация, когда имеется штамп паза и изменение его геометрии потребует дорогостоящей оснастки. Если многоуровневую оптимизацию не заложить в проектную систему, то она может быть неработоспособна для нетиповых технических заданий. Система может потерять гибкость [36-38, 60, 76, 83]. Подробное описание уровней оптимизации, заложенных в проектную систему, представлено в параграфах 2.5.1 – 2.5.10.

2.3 Требование совместимости с существующими программными системами

При проектировании двигателя разработчику необходимо выполнить электромагнитные, тепловые, вентиляционные, прочностные расчеты. Для самостоятельной разработки программ этих расчетов потребуется много времени и усилий. Современное развитие САЕ-систем позволяет воспользоваться уже готовыми, хорошо апробированными на практике программными средствами для этих расчетов. Разработчику нет необходимости идти по сомнительному пути самостоятельного создания этих систем. Задача разработчика заключается в том, чтобы включить в проектную систему на этапе анализа уже существующие программные средства. В качестве инструментов могут быть использованы следующие программные продукты:

- программный комплекс Ansys, позволяющий реализовать анализ электромагнитного и теплового состояния электрической машины по методу конечных элементов;
- программы 3D-моделирования, такие как Solidworks, Autodesk Inventor, КОМПАС 3D;
- программный продукт Ansys Citrix, позволяющий моделировать электронные схемы и алгоритмы взаимодействия между элементами электромеханических систем.

Указанные программные средства показали свою эффективность при проектировании электрических машин в условиях реального промышленного

производства. Эти программные средства могут быть включены в систему анализа в виде готовых блоков.

Создаваемая проектная система должна обладать открытым исходным кодом, чтобы пользователь мог корректировать структуру системы в зависимости от поставленных задач.

2.4 Выбор типа оптимизации

Электроприводы, в которых применяются ВЭКВ, в настоящее время проходят этап инновационного развития. На данном этапе для проектирования ВЭКВ больше всего подходит однокритериальная оптимизация, но для обеспечения гибкости проектной системы в нее может быть встроен ряд однокритериальных задач с различными показателями качества. Решение многокритериальной задачи предполагается реализовать на следующих этапах развития ВЭКВ на основе опыта эксплуатации.

С точки зрения нелинейного программирования задачу оптимизации в однокритериальной постановке можно сформулировать следующим образом: **для констант, определенных техническим заданием при наличии технологических и эксплуатационных ограничений, необходимо за счет перебора независимых переменных по заранее заданному алгоритму определить основные геометрические размеры, обеспечивающие максимальное или минимальное значение выбранного критерия.** На данном этапе критерий должен быть один, выбирает его разработчик из перечня критериев в зависимости от конкретной проектной ситуации.

В математической постановке задача оптимизации формулируется следующим образом:

Имеется целевая функция $f(x)$, определенная на n -мерном пространстве R^n , где $x = (x_1 \dots \dots x_n)^T$ вектор независимых переменных. Из множества допустимых решений $X \subseteq R^n$, среди элементов которого осуществляется поиск, необходимо найти такой вектор x^* , которому соответствует экстремальное значение целевой функции

$$f(x^*) = \min_{x \in X} f(x).$$

На рисунке 2.4.1 показана функциональная схема задачи однокритериальной оптимизации. Она показывает, что для построения системы синтеза необходимо построить в виде блоков математическую модель расчета и блок-оптимизатор. Математическая модель представляет собой совокупность последовательных уравнений, связанных условным переходом в узлах принятия решений. Конечной целью вычислений является определение выбранного в зависимости от проектной ситуации критерия оптимальности. Отдельным алгоритмическим блоком оформляется оптимизатор. Он содержит процедуру варьирования независимыми переменными и определения минимума или максимума показателя качества.



Рисунок 2.4.1. - Блок-схема задачи однокритериальной оптимизации

Критерии качества, независимые переменные, ограничения и константы описаны выше. В основу построения оптимизационной системы легла данная постановка задачи.

2.5 Выбор метода оптимизации

Разработка метода перебора независимых переменных представляет собой отдельную задачу. Решение этой задачи относится к разделу математики нелинейного программирования. Решение этой задачи не входит в рамки научной специальности, по которой проводится данное исследование. Задача разработчика заключается на основе анализа созданной математической модели выбрать готовый метод, позволяющий с минимальными затратами времени и ресурсов решить задачу оптимизации.

В открытых источниках приводится классификация и подробное описание методов оптимизации [55]. При этом большое количество методов говорит о том, что нет одного универсального, который подошел бы к решению задач оптимизации.

Идеальным был бы вариант подключения к математической модели разных методов и выбор наилучшего по результатам поиска экстремума. Но такой вариант на практике реализовать достаточно сложно. Это связано с тем, что блоки-оптимизаторы, как правило, не совместимы с существующими реальными задачами, и их необходимо приспособлять с точки зрения входных и выходных данных. Вторая причина заключается в том, что блоки-оптимизаторы в настоящее время не приспособлены для решения многоуровневых оптимизационных задач.

Проведем качественный анализ и предпримем попытку выбора блока-оптимизатора применительно к созданной математической модели.

Стохастические методы показывают хорошие результаты при поиске глобального экстремума при наличии нескольких локальных. Анализ математической модели показывает, что для ВЭКВ необходим поиск локального экстремума, поэтому применение стохастических методов малоэффективно для нашей задачи.

Из рассмотрения следует исключить также градиентные методы. Они очень плохо работают в ситуациях, когда экстремум находится на границе области допустимых значений. В нашей модели при наличии большого количества эксплуатационных и технологических ограничений это неприемлемо. Кроме этого,

градиентные методы не работают при наличии дискретных переменных, а в нашей модели дискретными являются число полюсов, число пазов и количество витков.

По названным причинам круг поиска ограничим прямыми детерминированными методами.

После проведения предварительного тестирования и основываясь на опыте применения различных методов оптимизации, был выбран метод, сочетающий в себе метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя) и метод однопараметрической оптимизации Фибоначчи [32-34]. Данный метод дает возможность работать как с непрерывными параметрами, так и с дискретными. Он положен в основу формирования блока-оптимизатора для системы синтеза.

2.5.1 Формирование уровней оптимизации

Как было отмечено ранее, для того чтобы проектная система была гибкой, она должна включать в себя несколько уровней оптимизации.

Для нового проекта, когда еще не определены ограничивающие факторы, имеется возможность изменять все варьируемые параметры, реализуя полную габаритную оптимизацию. Часто возникают ситуации, когда нужно провести оптимизацию одного конкретного узла в уже существующей электрической машине, для этого в проектную систему должен быть включен ряд уровней частичной габаритной оптимизации. Частичные уровни оптимизации позволяют модернизировать определенную часть электрической машины, не затрагивая другие узлы, что позволяет сохранить существующую оснастку. Это, в свою очередь, положительно сказывается на себестоимости конечного изделия. Нередко встречаются ситуации, когда изготовитель закупает большими партиями провод, постоянные магниты, другие комплектующие. Имеются ограничения, связанные с возможностями существующего у производителя оборудования.

При формировании проектной системы эти типовые ситуации можно предусмотреть и таким образом заранее определить уровни оптимизации.

2.5.2 Полная габаритная оптимизация

Это наиболее сложный и трудоемкий уровень оптимизации. На этом уровне перебираются все независимые переменные [2]. Его необходимо применять даже в случае, когда техническим заданием наложено несколько ограничений на проектную задачу. Он показывает наилучший по выбранному критерию вариант, при котором оптимум, как правило, не лежит на границе. Далее его можно сравнить с вариантом при наложении ограничений и оценить, насколько он отошел от варианта, когда таких ограничений нет. Это часто помогает заказчику изменить требования технического задания.

Определим основные параметры этого уровня. В качестве технического задания в данном методе приняты следующие константы:

- номинальные значения мощности, частоты вращения и напряжения;
- определенная классом нагревостойкости допустимая температура обмотки возбуждения и якорной обмотки;
- коэрцитивная сила и остаточная индукция постоянного магнита;
- удельное сопротивление меди в нагретом состоянии;
- определенный технологическими возможностями воздушный зазор;

В качестве ограничений следует принять следующие величины:

- ограничения, определенные точностью при реализации метода последовательных приближений;
- ограничения, определенные точностью и допусками при изготовлении деталей (минимальная и максимальная толщина магнита, минимальная ширина зубца при штамповке);
- ограничения, определенные условиями эксплуатации (допустимая плотность тока, требуемое значение КПД).

Независимыми переменными для данного уровня оптимизации являются:

- электромагнитные нагрузки (линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре);
- число пар полюсов;
- диаметр расточки якоря;

– внутренний диаметр якоря;

В качестве критериев оптимальности выберем следующие:

- наименьшая масса активных материалов (меди, стали и магнитов);
- наименьший объем активных материалов (меди, стали и магнитов);
- наименьшая масса постоянных магнитов.

Практика эксплуатации показала, что критерии наименьшей массы активных материалов и наименьшего объема активных материалов являются разными критериями и дают разную оптимальную геометрию. Это, прежде всего, обусловлено тем, что активные материалы имеют разную плотность. В данной ситуации разработчик принимает решение, какой вариант будет принят за основу для дальнейшего проектирования. Для каждого варианта проектная система рассчитывает все основные характеристики, позволяя разработчику принимать обоснованное решение [2].

2.5.3 Оптимизация при фиксированном числе полюсов

Применение этого уровня оптимизации характерно для высокоскоростных многополюсных электроприводов, в которых необходимо ограничить магнитные потери за счет снижения частоты перемагничивания в стали. Для этого уровня можно принять те же константы и ограничения, которые были выбраны для уровня полной габаритной оптимизации.

В качестве независимых переменных можно выбрать параметры полной габаритной оптимизации, зафиксировав при этом число полюсов.

- электромагнитные нагрузки (линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре);
- диаметр расточки якоря;
- внутренний диаметр якоря;

Число полюсов для этого уровня является заданным параметром.

Критерии оптимальности для этой проектной ситуации аналогичны показателям качества полной габаритной оптимизации, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов [2].

2.5.4 Оптимизация при заданном наружном диаметре

Оптимизация при заданном наружном диаметре характерна для мотор-колеса, когда ВЭКВ встраивается в автомобильный диск. Данное ограничение не позволяет получить мощность за счет наружного диаметра, так как он фиксирован. Требуемую мощность можно получить только за счет изменения осевой длины, при этом задача определения оптимальных значений остальной геометрии остается. Под остальной геометрией подразумевается магнитная цепь с допустимым насыщением, минимальная высота магнита, обеспечивающая заданную индукцию в воздушном зазоре [2].

2.5.5 Оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре

Для мотор-колеса с встроенным в него редуктором этот уровень оптимизации является характерным. Консольное исполнение внешнего ротора заставляет использовать внутренний объем. Константы и ограничения для этого уровня оптимизации совпадают с уровнем полной габаритной оптимизации.

В качестве независимых переменных при этом можно выбрать:

- электромагнитные нагрузки (линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре);
- число пар полюсов;
- диаметр расточки якоря;
- внутренний диаметр якоря;

Показатели качества для этого уровня совпадают с полной габаритной оптимизацией, а именно: минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов [2].

2.5.6 Оптимизация при заданной наружной длине

Ограничение мотор-колеса по осевой длине является характерной ситуацией, в особенности для автомобильного транспорта [2]. Заданную техническим заданием мощность ВЭКВ можно получить, только развивая его по диаметру расточки якоря.

Для этого уровня характерны константы и ограничения, принятые для полной габаритной оптимизации. В качестве показателя качества для этого уровня следует

принять критерии полной габаритной оптимизации при условии обеспечения заданной мощности. Это минимальная масса активных материалов, минимальный объем активной части, минимальная масса магнитов [2].

2.5.7 Оптимизация при заданных наружном и внутреннем диаметрах

Этот уровень оптимизации является типичным при проектировании мотор-колес. Ограничения одновременно по двум размерам (по наружному и внутреннему диаметрам) часто встречаются на практике [2]. Заданная техническим заданием мощность определяется осевой длиной.

В качестве варьируемых для этого уровня выбираются переменные:

- линейная нагрузка;
- индукция в воздушном зазоре;
- число полюсов.

В качестве показателя оптимальности принимается минимальная масса активных материалов.

2.5.8 Оптимизация при заданном наружном, внутреннем диаметрах и наружной длине

Оптимизация в заданных габаритах – достаточно часто встречающаяся проектная ситуация для мотор-колеса [2]. Часто возникает ситуация, когда из условия компоновки автомобиля нельзя выходить за объем диска, в который встраивается ВЭКВ.

Для данного уровня в качестве независимых переменных принимаются следующие параметры:

- электромагнитные нагрузки (линейная нагрузка, индукция в воздушном зазоре);
- число пар полюсов;
- диаметр расточки якоря;
- высота постоянного магнита;
- высота паза якоря.

Основным критерием для данной ситуации становится максимальная мощность, которую можно получить в этих габаритах при принятых ограничениях [2].

2.5.9 Оптимизация при фиксированных размерах постоянного магнита

Эта проектная ситуация достаточно типична. В условиях рынка производитель часто закупает большую оптовую партию магнитов. Часто возникает задача использовать этот задел в производстве. Кроме этого, производителю выгодно изготавливать магниты не по специальному заказу, а формировать размерный ряд и предлагать его заказчику. Такие магниты стоят гораздо дешевле, чем магниты, изготовленные по специальному заказу.

Разработчику следует иметь в виду, что заданные размеры магнита могут значительно отличаться от оптимальных. Поэтому результаты данного уровня оптимизации целесообразно сравнить с полной габаритной оптимизацией. Это поможет сделать правильный с экономической точки зрения выбор: использовать серийные магниты или заказать специальные магниты с оптимальной геометрией.

В качестве критерия оптимальности для того уровня принимаются минимальная масса активных материалов при обеспечении заданной технической заданием мощности.

2.5.10 Поверочный расчет

Поверочный расчет не является оптимизационным, но он вписывается в систему оптимизации как вариант, при котором все варьируемые переменные заданы. При этом не происходит перебора вариантов, а делается расчет только одного варианта при известных исходных данных.

Если разработчик имеет достаточный опыт, он может, используя поверочный расчет, самостоятельно варьировать переменные для нахождения оптимального варианта. Это придает большую гибкость проектной системе.

В отличие от существующих проектных систем, которые реализуют только одну проектную ситуацию, предлагаемая система синтеза покрывает практически все возможные варианты технических заданий. Если возникает проектная

ситуация, которая не вписывается в систему, то ее всегда можно реализовать, выбрав близкий уровень оптимизации, а затем, выполнить поверочный расчет.

Возможны обратные ситуации. Допустим, вам принесли для анализа электрическую машину с неизвестными характеристиками. С применением проектной системы вы можете провести поверочный расчет, а затем выполнить оптимизацию любого уровня, показав заказчику возможные резервы изделия.

На основе данной концепции однокритериальной многоуровневой оптимизации с применением языка программирования высокого уровня Delphi была разработана система оптимального проектирования ВКЭВД, которая способна реализовать различные проектные ситуации [2]. Интерфейс программы синтеза показан на рисунке 2.5.10.1.

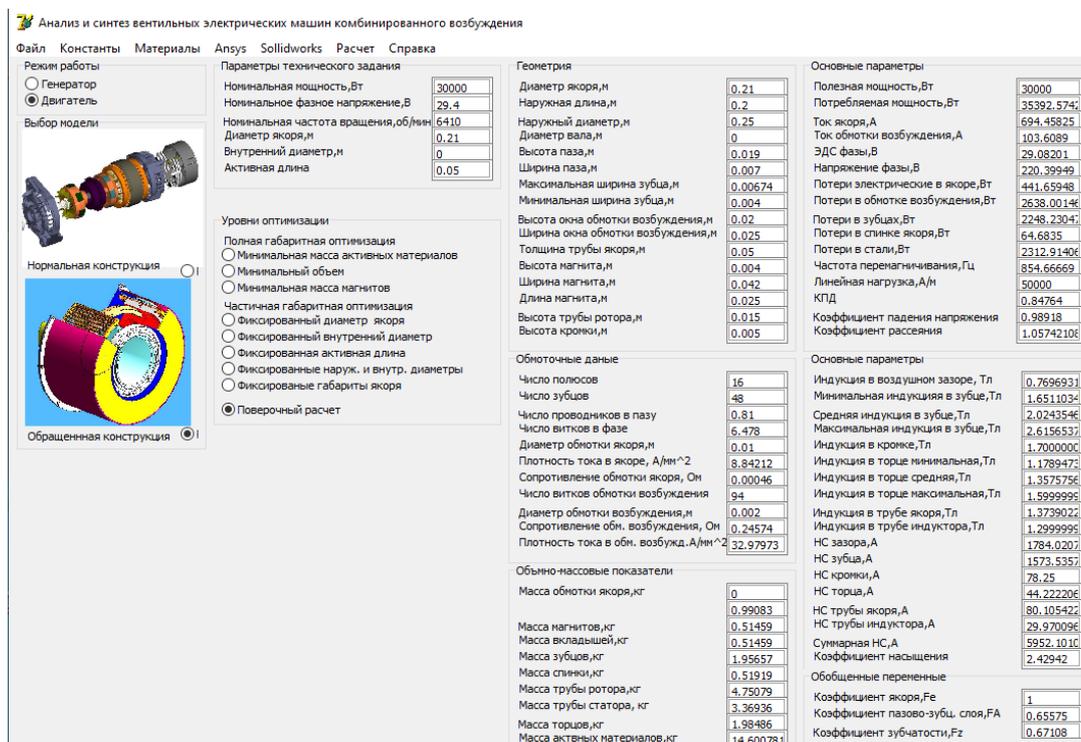


Рисунок 2.5.10.1 - Интерфейс системы однокритериальной многоуровневой оптимизации ВКЭВД

Выводы по главе 2

1. На основании анализа существующих методов оптимального проектирования для создания системы синтеза выбрана однокритериальная оптимизация. При этом для придания гибкости проектной системе сформировано

несколько критериев, которые разработчик может выбирать в зависимости от особенностей проекта.

2. Для формирования блока оптимизации выбран хорошо опробованный на практике метод, который сочетает в себе метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя) при движении к оптимуму с методом Фибоначчи при определении шага.

3. Определено понятие многоуровневой однокритериальной оптимизации. Для каждого уровня оптимизации определены константы, ограничения, независимые переменные и показатели качества.

4. Разработана система синтеза ВЭКВ на основе параметрической многоуровневой оптимизации. Благодаря наличию нескольких уровней оптимизации система позволяет реализовать до 8 проектных ситуаций в зависимости от технического задания заказчика - от полной габаритной оптимизации до поверочного расчета. Систему можно использовать как для создания новых конструкций, так и для анализа с точки зрения оптимальной геометрии существующих конструкций ВЭКВ.

3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО АНАЛИЗА ВЭКВ

Вводные замечания

После работы системы синтеза мы получаем полностью спроектированное изделие с оптимальными с точки зрения выбранного критерия геометрическими размерами. Система синтеза содержит в себе математическую модель, содержащую все необходимые взаимосвязи в электродвигателе. Она содержит поверочный расчет, который выводит все основные результаты. Возникает вопрос о необходимости и целесообразности разработки дополнительной системы анализа на основе достаточно трудоемких САЕ-систем. Практика показывает, что это необходимо делать. Обусловлено это недостаточной точностью математической модели, базой которой является метод схем замещения. Эта модель достаточно проста, что позволяет включить ее в циклы оптимизации, но она построена на большом количестве ограничений и допущений. Основные параметры и рабочие характеристики при этом определяются с погрешностью, которая и может превышать 10-15 %. Для современного производства это ведет к техническим рискам невыполнения технического задания. По этой причине результаты оптимизации необходимо проверить с помощью более точных методов расчета, какими являются программные средства на основе метода конечных элементов. В инженерной практике используется достаточно большое количество таких программ. Для нашей системы анализа выберем хорошо проверенную на практике программу Ansys Electronics Desktop. Передача данных из системы синтеза в систему анализа осуществляется через встроенный программный код.

3.1 Разработка модели электромагнитного анализа ВЭКВ

Следует отметить, что анализ электрических машин в программе Ansys Electronics Desktop основан на двух методах: методе схем замещения и методе конечных элементов. Он хорошо апробирован и содержит в себе 17 различных типов стандартных электрических машин. Задача для анализа во многом упрощается, если анализируемая конструкция попадает в данный перечень. Для этого необходимо заполнить типовые таблицы с размерами и параметрами

материалов и сделать поверочный расчет. ВЭКВ имеет уникальную магнитную систему и не попадает в ряд стандартных конструкций. Для построения цифровой модели необходимо воспользоваться инструментом трехмерного твердотельного моделирования, встроенного в программу. Предварительно конструкция была параметризирована. Это означает, что все размеры, однозначно определяющие геометрию, являются переменными, что позволяет выстраивать различные конструкции по результатам оптимизации.

В качестве таких параметров выбраны:

- диаметр расточки якоря;
- длина пакета якоря;
- высота магнита;
- величина воздушного зазора;
- расстояние между пакетами якоря;
- высота паза;
- ширина паза;
- высота спинки якоря;
- высота кромки;
- высота спинки индуктора;
- высота окна обмотки возбуждения;
- ширина окна обмотки возбуждения;
- диаметр вала;
- число полюсов.

Эти параметры передаются из системы синтеза после окончания оптимизационных расчетов. По этим параметрам выстраивается геометрия ВЭКВ (см. рисунок 3.1.1).

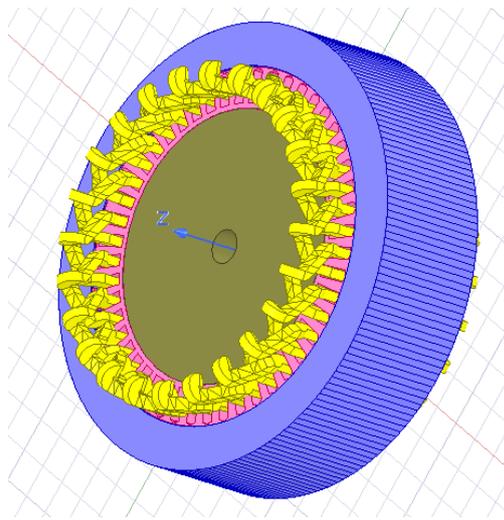


Рисунок 3.1.1 - Параметризованная геометрия ВЭЖВ

Информация о материалах электротехнической стали, конструкционной стали, постоянных магнитов, обмоток якоря и возбуждения тоже передается через скрипт. Для определения намагничивания радиальных постоянных магнитов использовалась цилиндрическая система координат.

Для упрощения расчетов была использована осевая симметрия, которая ограничила расчетную область двумя полюсными делениями (см. рисунок 3.1.2).

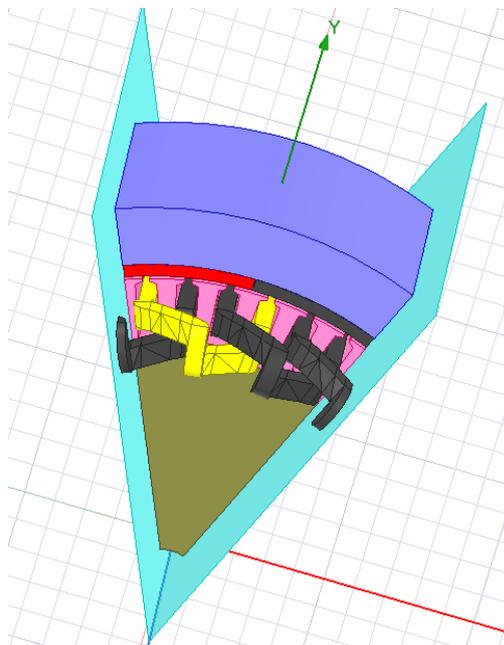


Рисунок 3.1.2 - Расчетный объем с учетом осевой симметрии

Токовая нагрузка задавалась от внешнего источника через токовые терминалы (см. рисунок 3.1.3).

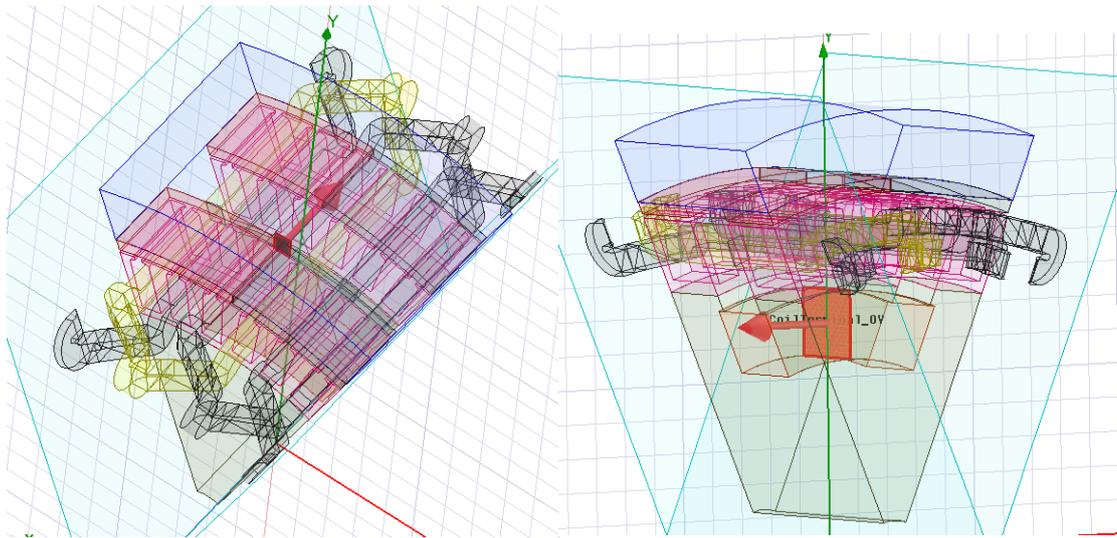


Рисунок 3.1.3 - Задание токовой нагрузки в фазах и обмотке возбуждения

Анализ режимов работы ВЭКВ проводился в режиме Transient, который имеет возможность рассчитывать динамические характеристики с учетом изменения положения ротора и частоты его вращения. Во вращающуюся область Bond были включены постоянные магниты и спинка индуктора, которые имеют более простую геометрию. В модели учитывалось влияние вихревых токов на поверхностях магнитов и в теле магнитной системы.

Результаты анализа электромагнитного состояния двигателя представлены на рисунке 3.1.4.

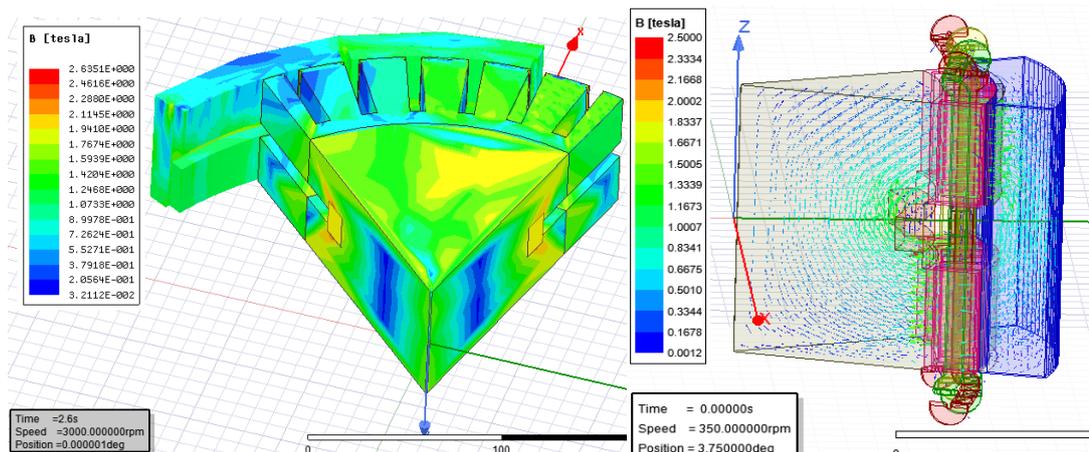


Рисунок 3.1.4 - Результаты расчета электромагнитного поля

В процессе цифрового тестирования электродвигатель разгонялся от нулевой скорости до скорости холостого хода.

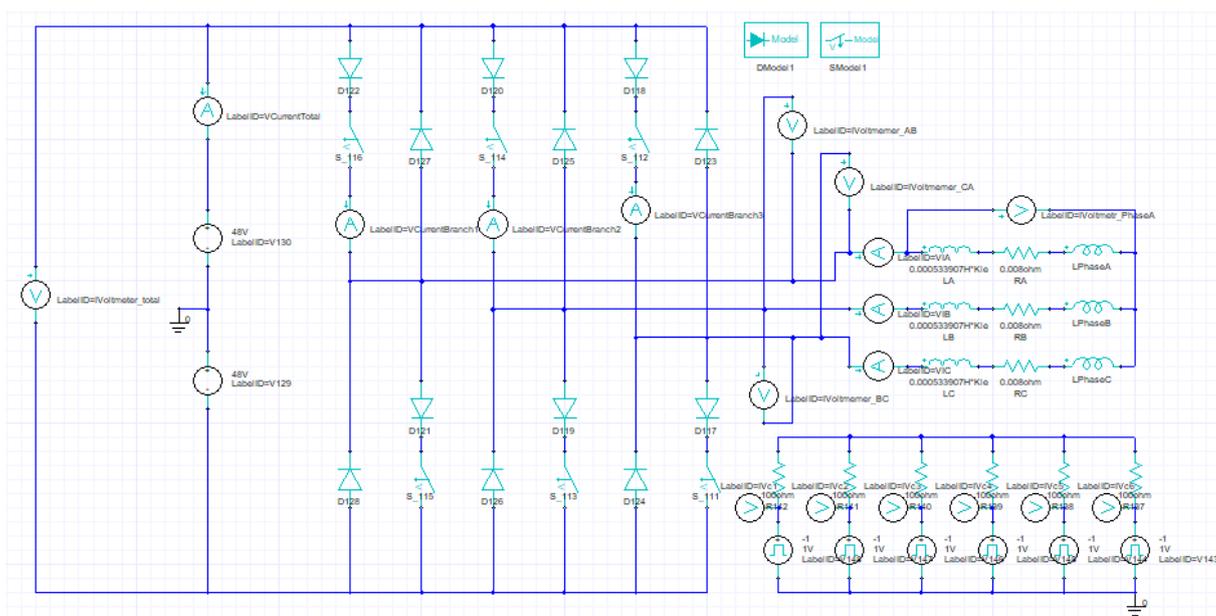
3.2 Моделирование электронного коммутатора для анализа динамических характеристик

Особенность работы вентиляльных двигателей заключается в том, что бесконтактный токоподвод к нему осуществляется через электронный коммутатор.

Теоретически для вентиляльного двигателя можно применить векторное управление и дискретную коммутацию.

Векторное управление имеет сложный алгоритм. Достоинством его является плавное управление вектором намагничивающей силы поля якоря. По энергетическим характеристикам этот тип коммутации превосходит другие известные типы, но этот способ управления является самым дорогим. Его имеет смысл применять для высокоточных приводов. Для электротрансмиссии транспортного средства, находящейся на этапе инновационного развития, реализация задачи векторного управления является достаточно сложной и на этом этапе не целесообразной.

Выберем дискретную 120-градусную коммутацию, которая хорошо зарекомендовала себя на практике и имеет приемлемую цену. Задача анализа несколько упрощается из-за наличия имитатора схем с этим коммутатором в программе (см. рисунок 3.1.5).



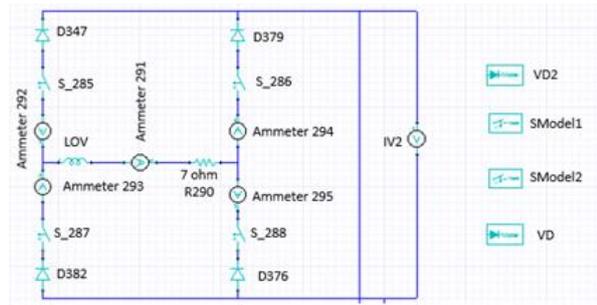


Рисунок 3.2.1 - Электронный коммутатор, реализующий 120-градусную коммутацию, построенный с применением имитатора электронных схем и система управления с обмоткой возбуждения

Данный коммутатор подключен к фазам ВЭКВ как внешняя цепь. Он имеет настройки реального коммутатора, так как учитывает ЭДС фаз, активные и индуктивные сопротивления фазных обмоток.

Разработанная модель двигателя, рассчитанная по методу конечных элементов с подключенным к ней коммутатором, является цифровым двойником реального макетного образца ВЭКВ.

Ниже приводятся характеристики, полученные в результате цифрового моделирования двигателя для мотор-колеса (рисунок 3.2.2-3.2.7).

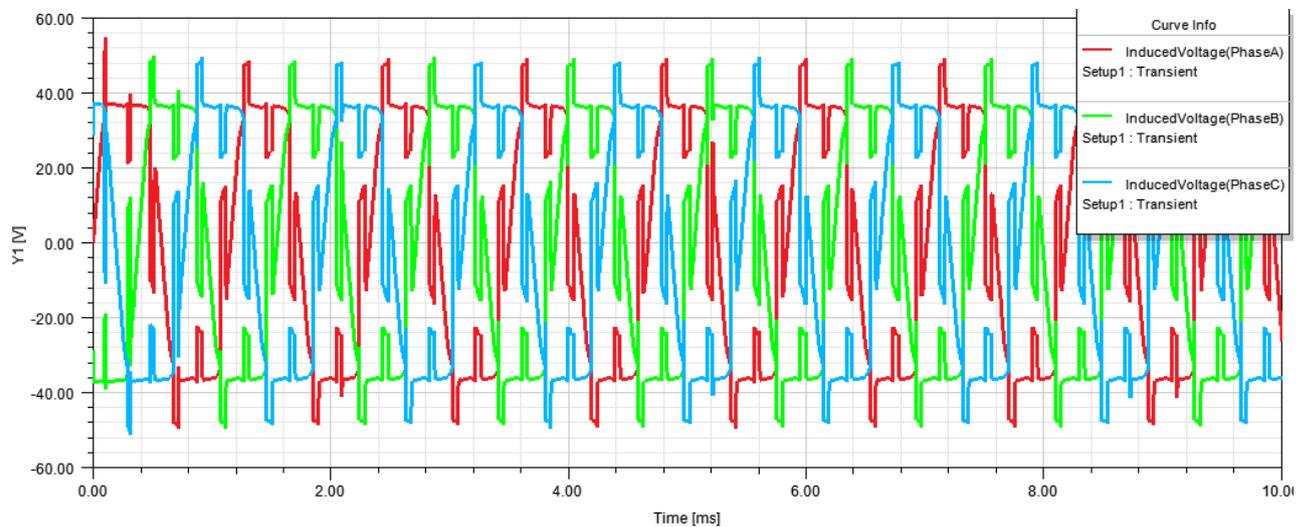


Рис.3.2.2 - Фазные ЭДС

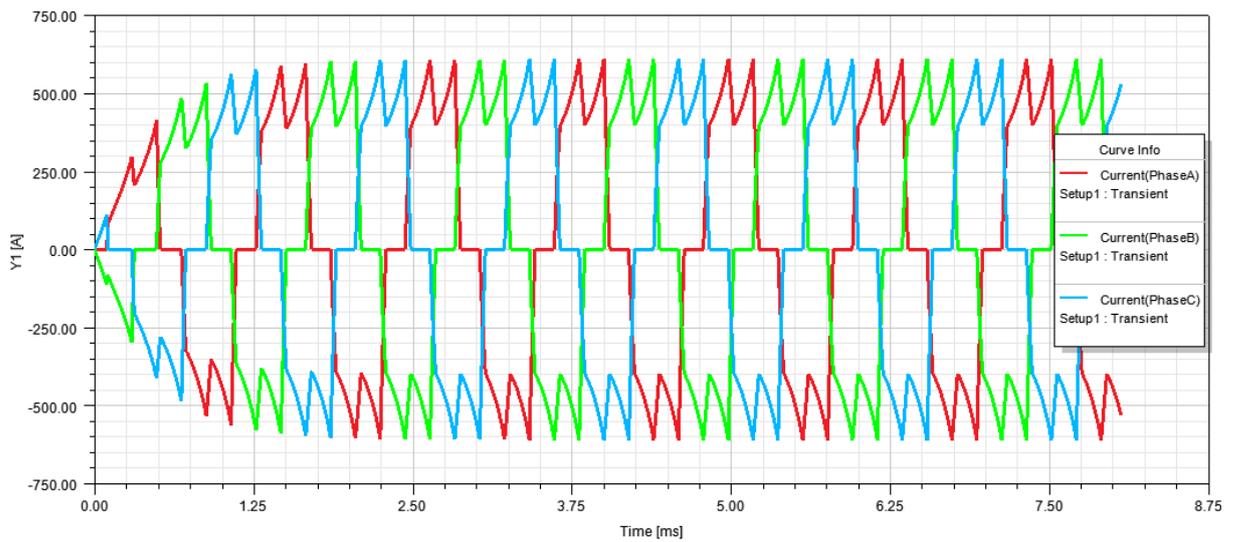


Рисунок 3.2.3 – Осциллограмма фазных токов в номинальном режиме работы

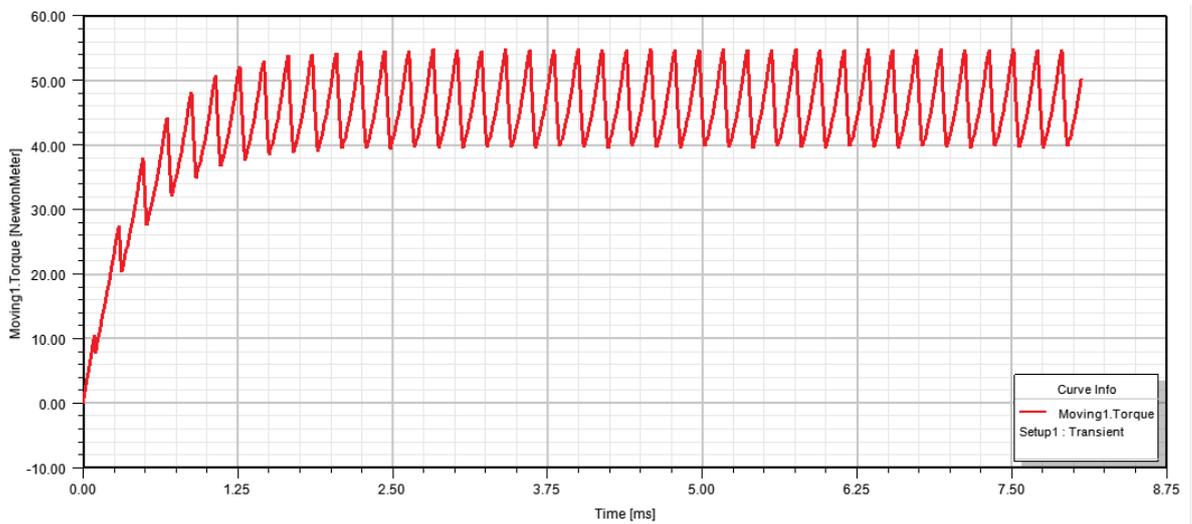


Рисунок 3.2.4 - Момент на валу в номинальном режиме работы

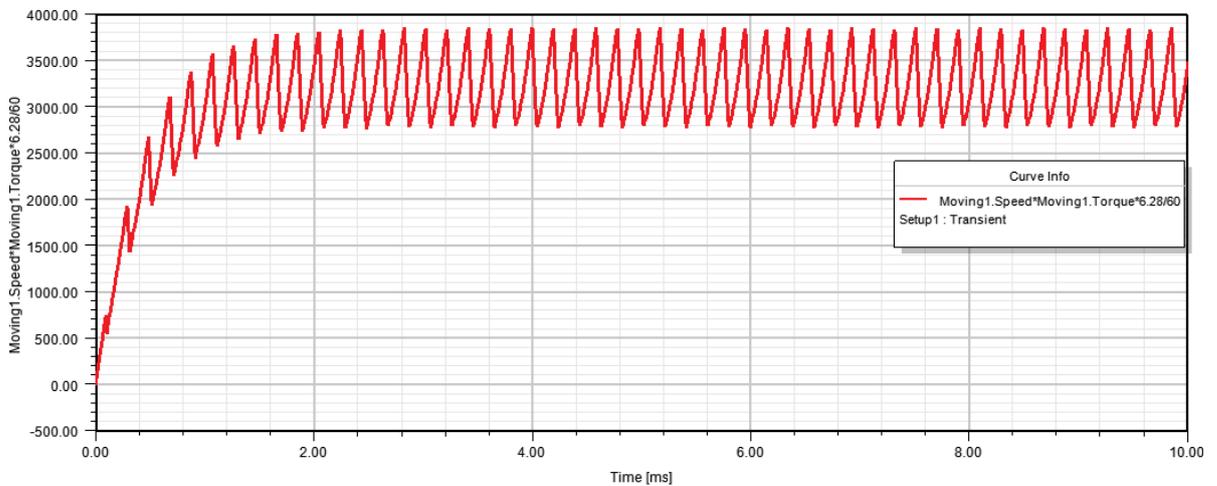


Рисунок 3.2.5 - Диаграмма полезной мощности на валу при номинальном режиме работы

Приведенные кривые основных параметров и характеристик соответствуют параметрам реального макетного образца ВЭКВ, а также характеристикам, полученным на этапе синтеза. Это говорит о том, что созданная цифровая модель практически является цифровым двойником реальной электрической машины и может быть использована для системы анализа при проектировании ВЭКВ данного типа [164-174].

3.3 Разработка подсистемы теплового анализа ВЭКВ

Оценка теплового состояния является очень важной для электротрансмиссии транспортных средств. Можно разработать привод, который удовлетворяет всем техническим требованиям, изложенным в техническом задании, но систему охлаждения спроектировать неэффективной. При этом вводить электропривод в эксплуатацию будет нельзя, так как перегрев отдельных частей приведет к ускоренному старению изоляции и, как следствие, к короткому замыканию. Оценка теплового состояния для транспортного средства осложняется тем, что в процессе движения меняются электромагнитные нагрузки и требуется проводить не стационарные расчеты, а динамические [81].

Выберем тип охлаждения применительно к электротрансмиссии мотор-колеса. Отечественная практика и зарубежный опыт показывают, что применение воздушного охлаждения неэффективно. Это связано с тем, что достаточно сложно обеспечить движение воздушных потоков в мотор-колесе. Оно находится в агрессивных условиях эксплуатации, включая пыль, грязь, повышенную влажность, изморозь. Кроме этого, применение высококоэрцитивных постоянных магнитов имеет свою особенность. В окружающей среде находятся ферромагнитные частицы. Они могут забивать внутреннее пространство двигателя, постепенно накапливаясь. Извлечь их достаточно сложно даже при ремонтных работах. Поэтому внутренний объем мотор-колеса необходимо закрывать. В закрытой конструкции невозможно применить эффективное воздушное охлаждение.

По вышеназванным причинам выберем жидкостное охлаждение. Этот выбор обусловлен тем, что в транспортном средстве уже имеется система жидкостного

охлаждения других узлов электромобиля и электродвигатель можно подключить к этой системе. Необходимо определить место размещения системы охлаждения в мотор-колесе. В двигателе можно выделить следующие потери:

- магнитные потери в зубцах статора;
- магнитные потери в спинке статора;
- электрические потери в обмотке статора;
- электрические потери в обмотке возбуждения;
- добавочные потери от высших гармоник;
- механические потери.

Следует отметить, что основная часть потерь (электрические и магнитные) концентрируются в зубцовой зоне и зоне обмотки возбуждения. Следовательно, охлаждающую жидкость следует провести под обмоткой возбуждения. Такое расположение охлаждающих каналов позволит эффективно охлаждать саму обмотку возбуждения. Кроме этого, путь теплового потока от зубцов и обмотки якоря к каналам охлаждения будет достаточно коротким, что приведет к эффективности отвода тепла.

Предлагаемая система охлаждения ВЭКВ изображена на рисунке 3.3.1.

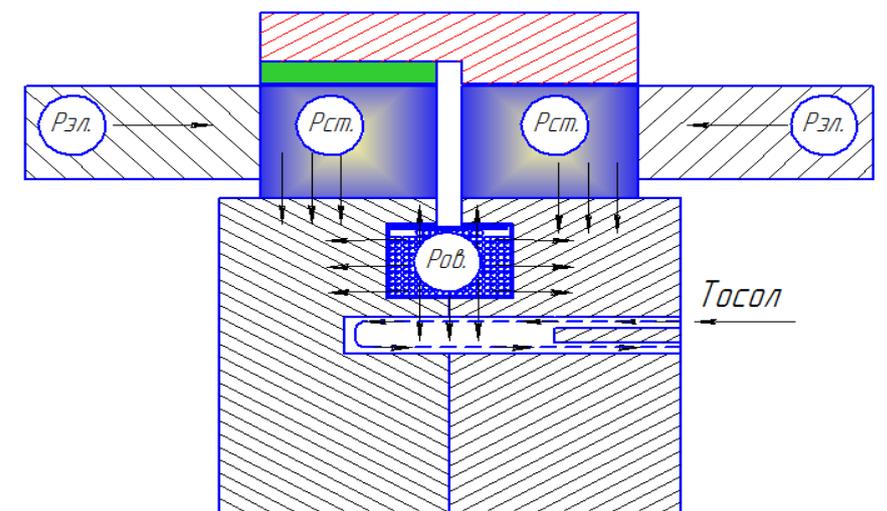


Рисунок 3.3.1 - Эскиз системы охлаждения двигателя для определения схемы движения тепловых потоков

Следует отметить, что мотор-колесо работает в перемежающемся режиме. Частота вращения и момент на валу меняются в широком диапазоне. В связи с этим

важно иметь тепловую модель, которая учитывала бы динамику нагрева и остывания активных частей ВЭКВ. Воспользуемся методом эквивалентных тепловых схем замещения, который позволяет наряду со статическим методом определения температуры рассчитать динамический нагрев. Эквивалентная тепловая схема замещения ВЭКВ, позволяющая рассчитать динамический нагрев активных частей электродвигателя (обмотки якоря, обмотки возбуждения, зубцовой зоны, массивного магнитопровода), представлена на рис. 3.3.2.

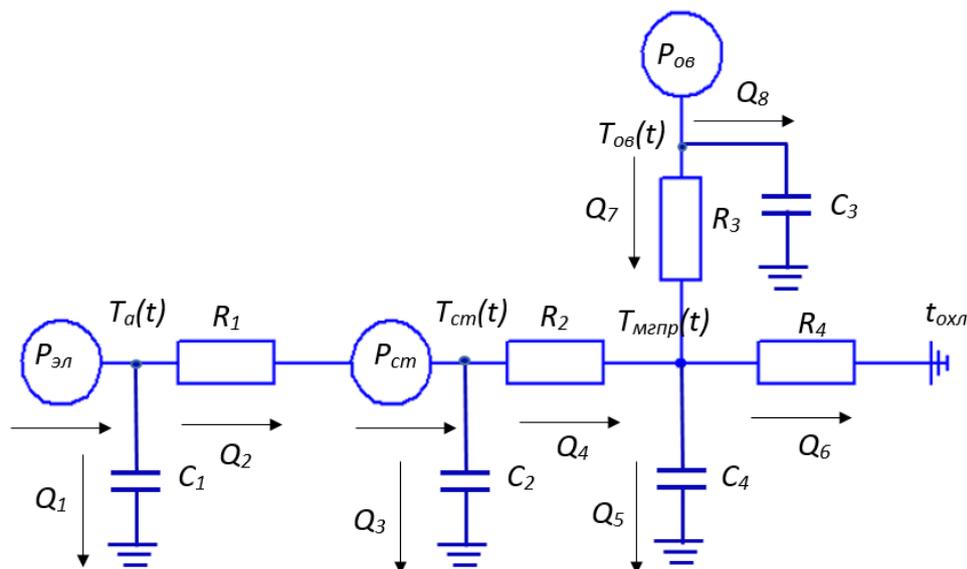


Рисунок 3.3.2 - Тепловая схема замещения жидкостного охлаждения ВЭКВ, учитывающая динамику нагрева активных частей

На схеме представлены следующие условные обозначения:

$P_{эл}$ – электрические потери в обмотке якоря;

$P_{об}$ – электрические потери в обмотке возбуждения;

$P_{см}$ – суммарные магнитные потери в зубцовой зоне якоря и спинке якоря;

$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8$ – тепловые потоки схемы замещения;

$T_a(t)$ – функция температуры обмотки якоря от времени;

$T_{см}(t)$ – функция температуры пакета якоря (зубцы и спинка) от времени;

$T_{об}(t)$ – функция температуры обмотки возбуждения от времени;

$T_{мгп}(t)$ – функция температуры массивного магнитопровода от времени;

$t_{охл}$ – температура охлаждающего агента жидкостной системы охлаждения;

R_1, R_2, R_3, R_4 – тепловые сопротивления движения тепловым потокам;

C_1, C_2, C_3, C_4 – емкостные накопители тепла для тепловых потоков.

Рассчитаем параметры схемы замещения:

1. Тепловое сопротивление потока, идущего через стенки пазов в зубцовую зону и спинку статора, °C/Вт:

$$R_1 = \frac{\delta_{из}}{2 \cdot \lambda_{эКВ} \cdot (h_{паз} - b_{паз}) \cdot L_{\delta} \cdot Z}, \quad (3.1)$$

где $\lambda_{эКВ}$ - эквивалентный коэффициент теплопроводности пазовой изоляции, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$; $\delta_{из}$ - толщина пазовой изоляции, м.

2. Тепловое сопротивление потока в стали, °C/Вт:

$$R_2 = \frac{h_{паз}}{2 \cdot \lambda_d \cdot \pi \cdot (D_{я} - 2 \cdot (h_{паз} + h_a)) \cdot L_{\delta}}. \quad (3.2)$$

где λ_d - коэффициент теплопроводности стали 10, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$.

3. Тепловое сопротивление потока, проходящего через стенки катушки обмотки возбуждения, °C/Вт:

$$R_3 = \frac{\delta_{из_{ов}}}{\lambda_{эКВ} \cdot S_3}. \quad (3.3)$$

где $\delta_{из_{ов}}$ - толщина пазовой изоляции обмотки возбуждения, м; $\lambda_{эКВ}$ - эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции катушки обмотки возбуждения, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$; S_3 - площадь прохождения теплового потока через стенки катушки обмотки возбуждения, м².

4. Тепловое сопротивление схождения тепла от тепловых потоков машины, °C/Вт:

$$R_{сх.тепла} = \frac{L_{\delta}}{2 \cdot \alpha_0 \cdot S_{охл}}, \quad (3.4)$$

где $S_{охл}$ - площадь поверхности охлаждения, м²; α_0 - коэффициент теплоотдачи хладагента, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$.

5. Емкостный накопитель тепла для обмотки якоря, Дж/°C

$$C_1 = C_{меди} \cdot m_{об.я}, \quad (3.5)$$

где $C_{меди}$ - удельная теплоемкость меди $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$; $m_{об.я}$ - масса обмотки якоря, кг.

6. Емкостный накопитель тепла для пакета якоря, Дж/°C

$$C_2 = C_{стали} m_{стали}, \quad (3.6)$$

где $C_{\text{стали}}$ – удельная теплоемкость стали, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$; $m_{\text{стали}}$ – масса пакета якоря, кг.

7. Емкостный накопитель тепла для обмотки возбуждения, Дж/ $^{\circ}\text{C}$

$$C_3 = C_{\text{меди}} m_{\text{ов}}; \quad (3.7)$$

где $m_{\text{ов}}$ – масса обмотки возбуждения, кг;

8. Емкостный накопитель тепла для массивного магнитопровода, Дж/ $^{\circ}\text{C}$

$$C_4 = C_{\text{стали}} m_{\text{мгпр}}; \quad (3.8)$$

где $m_{\text{мгпр}}$ – масса массивного магнитопровода, кг.

Для узлов схемы замещения можно записать следующую систему уравнения баланса магнитных потоков:

$$P_{\text{эл}} = Q_1 + Q_2; \quad (3.9)$$

$$Q_2 + P_{\text{ст}} = Q_3 + Q_4; \quad (3.10)$$

$$P_{\text{ов}} = Q_7 + Q_8; \quad (3.11)$$

$$Q_4 + Q_7 = Q_5 + Q_6. \quad (3.12)$$

Выражения для тепловых потоков можно определить следующим образом:

$$Q_1 = C_1 \frac{dT_a(t)}{dt}; \quad (3.13)$$

$$Q_2 = \frac{1}{R_1} (T_a(t) - T_{\text{ст}}(t)); \quad (3.14)$$

$$Q_3 = C_2 \frac{dT_{\text{ст}}(t)}{dt}; \quad (3.15)$$

$$Q_4 = \frac{1}{R_2} (T_{\text{ст}}(t) - T_{\text{мгпр}}(t)); \quad (3.16)$$

$$Q_5 = C_4 \frac{dT_{\text{мгпр}}(t)}{dt}; \quad (3.17)$$

$$Q_6 = \frac{1}{R_4} (T_{\text{мгпр}}(t) - t_{\text{охл}}); \quad (3.18)$$

$$Q_7 = \frac{1}{R_3} (T_{\text{ов}}(t) - T_{\text{мгпр}}(t)); \quad (3.19)$$

$$Q_8 = C_3 \frac{dT_{\text{ов}}(t)}{dt}; \quad (3.20)$$

В результате взаимной подстановки получаем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_a(t)}{dt} = \frac{P_{эл}}{C_1} - \frac{1}{C_1 R_1} (T_a(t) - T_{ст}(t)) \\ \frac{dT_{ст}(t)}{dt} = \frac{1}{C_2 R_1} (T_a(t) - T_{ст}(t)) + \frac{P_{ст}}{C_2} - \frac{1}{C_2 R_2} (T_{ст}(t) - T_{мгпр}(t)) \\ \frac{dT_{ов}(t)}{dt} = \frac{P_{ов}}{C_3} - \frac{1}{C_3 R_3} (T_{ов}(t) - T_{мгпр}(t)) \\ \frac{dT_{мгпр}(t)}{dt} = \frac{1}{C_4 R_2} (T_{ст}(t) - T_{мгпр}(t)) + \frac{1}{C_3 R_3} (T_{ов}(t) - T_{мгпр}(t)) - \frac{1}{C_4 R_4} (T_{мгпр}(t) - t_{охл}) \end{array} \right. \quad (3.21)$$

Данную систему уравнений можно решить одним из известных математических методов, например методом Рунге-Кутты, реализованным в программной среде Mathcad в стандартной функции `rkfixed` (y, x_1, x_2, p, D).

Аргументы функции:

y – вектор начальных условий из k элементов (k – количество уравнений в системе);

x_1, x_2 – левая и правая граница, на которой ищется решение системы дифференциальных уравнений;

p – число точек внутри интервала (x_1, x_2), на котором ищется решение;

D – вектор, состоящий из k элементов, который содержит первую производную искомых функций.

Найдем решение системы дифференциальных уравнений для самого нагруженного варианта, когда электродвигатель имеет максимальные медные и стальные потери в длительном режиме работы. В качестве охлаждающего агента примем тосол с температурой 90 °С.

$$y_0 := \begin{pmatrix} t_{охл} \\ t_{охл} \\ t_{охл} \\ t_{охл} \end{pmatrix} \quad D(t, T) := \begin{bmatrix} \frac{P_{эл}}{C_1} - \frac{1}{C_1 R_1} \cdot (T_0 - T_1) \\ \frac{P_{мгпр}}{C_2} + \frac{1}{C_2 R_1} \cdot (T_0 - T_1) - \frac{1}{C_2 R_2} \cdot (T_1 - T_3) \\ \frac{P_{ОВ}}{C_3} - \frac{1}{C_3 R_3} \cdot (T_2 - T_3) \\ \frac{1}{C_4 R_2} \cdot (T_1 - T_3) + \frac{1}{C_4 R_3} \cdot (T_2 - T_3) - \frac{1}{C_4 R_{схода}} \cdot (T_3 - t_{охл}) \end{bmatrix}$$

`Temperatura := rkfixed(y_0, 0, 360, M, D)`

Рисунок 3.3.3 – Фрагмент решения системы дифференциальных уравнений динамического теплового анализа в программе Mathcad

Ряд предварительных расчетов показал, что в течении 350 с температуры активных частей приходят к установившемуся значению. На рисунке 3.3.4 представлены результаты решения в виде графических зависимостей.

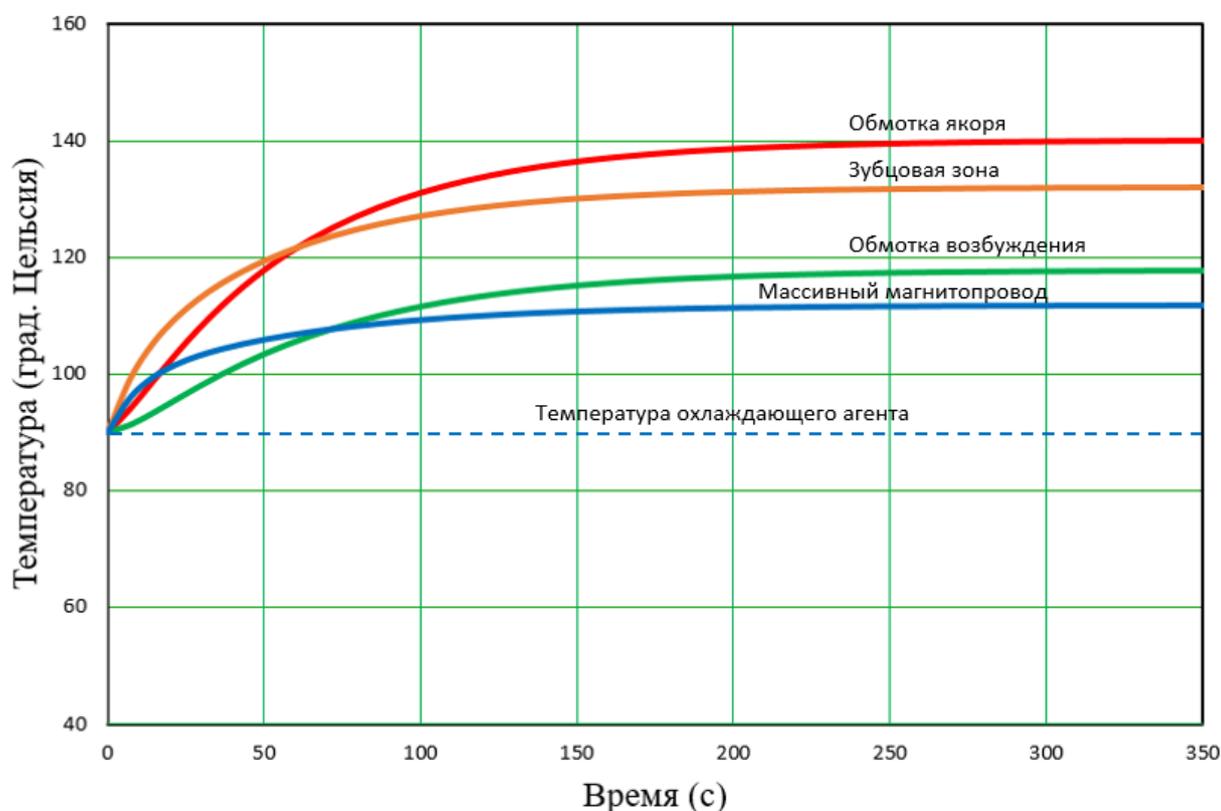


Рисунок 3.3.4 – Динамика нагрева активных частей ВЭКВ при непрерывном режиме работы

Наиболее нагретой частью ВЭКВ является обмотка якоря (140 °С). Остальные температуры располагаются ниже. Эти температуры соответствуют классу нагревостойкости изоляции F (155 °С). Постоянные магниты нагреваются существенно меньше, так как находятся на вращающейся части и дополнительно охлаждаются при помощи конвекции. При рабочей температуре постоянных магнитов 150 °С опасности размагничивания магнитов от эффекта Кюри нет. При перемежающемся режиме работы нагрев активных частей будет ниже, что приемлемо для нормальной эксплуатации мотор-колеса.

Выводы по главе 3

1. Разработана система анализа электромагнитного состояния с использованием компьютерного моделирования в программной среде Ansys

Electronics Desktop. Модель связана с системой синтеза через программный код, который передает параметры оптимальной геометрии из системы синтеза в систему анализа.

2. Компьютерная модель подключена к имитатору электронной системы управления, которая позволяет снять характеристики в режиме реальных нагрузок. Данная модель представляет собой цифровой двойник реального электродвигателя, что позволяет снизить технические риски перед производством промышленного образца.

3. Разработана система жидкостного охлаждения ВЭКВ и математическая модель для нее, которая позволяет выполнить динамический анализ теплового состояния электродвигателя. Модель включена в проектную систему и позволяет контролировать нагрев ВЭКВ.

4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ МОТОР-КОЛЕСОМ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Вводные замечания

Представленная проектная система позволяет спроектировать ВЭКВ для мотор-колеса транспортного средства, но созданием исполнительного силового органа разработка электротрансмиссии не заканчивается. Особенность проектирования электрических машин заключается в том, что габаритные размеры и обмоточные данные определяются одной, как правило, номинальной точкой эксплуатации, при этом необходимо знать, как будет работать электродвигатель в широком диапазоне изменения скоростей и моментов при движении по реальной трассе. Проектная система должна заканчиваться такой проверкой. Она позволит при необходимости откорректировать геометрию и обмоточные данные электродвигателя, которые позволили бы обеспечить ему необходимые статические и динамические характеристики. Необходимость разработки такой системы обусловлена еще тем обстоятельством, что корректировка электродвигателя связана с большими временными и материальными затратами. Если корректировка системы управления связана с изменением программы и алгоритма управления, в крайнем случае, заменой в плате управления нескольких электронных компонентов, то корректировка электродвигателя, как правило, требует его полной замены.

Современные вычислительные средства позволяют провести цифровое испытание электротрансмиссии транспортного средства в условиях, максимально приближенных к реальным. Задачей данной главы является разработка такой цифровой системы и проверка параметров электродвигателя, алгоритмов управления и самой электротрансмиссии в условиях цифрового тестирования.

4.1 Разработка математической модели алгоритма управления ВЭКВ

Как было отмечено, основным преимуществом ВЭКВ является возможность регулирования момента и частоты вращения по двум каналам управления: по цепи якоря и по цепи возбуждения. При этом с энергетической точки зрения управление по цепи возбуждения очень выгодно. Это связано с тем, что из общего баланса энергии в электрической машине на цепь возбуждения в зависимости от мощности приходится от 1.0 до 5.0 % процентов от общей потребляемой мощности. При этом есть возможность обеспечить широкий диапазон регулирования. На практике это означает, что в широком диапазоне электродвигателем можно управлять с помощью одного низковольтного слаботочного ключа, подключая к управлению силовую цепь только в кратковременных условиях перегрузки.

При разработке алгоритма примем следующие ограничения и упрощения:

1. Реальную трассу электромобиля разобьем на отдельные участки. Число участков может быть достаточно большим и практически неограниченным, но на отдельном участке ускорение транспортного средства примем постоянным: положительным при разгоне, нулевым при постоянной скорости движения и отрицательным при торможении. Такое ограничение связано с упрощением моделирования реальной трассы. На участке будем задавать только величину дистанции и среднюю скорость. Величина уклона подъема и уклона ската тоже принимается постоянной.

2. При изменении питающего напряжения максимальное его значение не должно превысить номинальное значение напряжения аккумуляторной батареи. Регулировка режима движения в этом случае должна осуществляться по цепи возбуждения.

3. В алгоритм вводится токоограничение по якорной цепи электродвигателя. Это связано с защитой силовых ключей в тяжелонагруженных режимах: старт, движение в гору, рекуперация при торможении. При токоограничении транспортное средство может не выдержать предписанный ему скоростной режим. Оно при этом будет двигаться с максимально возможным ускорением при этом ограничении тока.

4. В системе учитывается рекуперация электроэнергии в аккумуляторную батарею в режимах, когда динамический момент автомобиля при торможении превышает статические моменты трения электротрансмиссии.

5. При расчете магнитных потерь полагается, что машине комбинированного возбуждения магнитный поток от постоянных магнитов проходит по своей магнитной цепи и не изменяется, а магнитный поток от обмотки возбуждения проходит тоже по своей цепи и зависит от величины тока возбуждения. Влиянием реакции якоря в данном случае можно пренебречь из-за значительного магнитного сопротивления радиальных пистонных магнитов.

В математическую модель системы управления вошли следующие аналитические выражения:

Расчетные параметры для автомобиля

Приведение скорости автомобиля (м/с) к оборотам колеса (об/мин)

$$n_0 = \frac{V_0 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot r_k}, \quad (4.1)$$

где V_0 – скорость автомобиля в начале участка; r_k – радиус колеса по внешнему размеру шины.

Приведение скорости колеса из об/мин в рад/с

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60}. \quad (4.2)$$

Линейное ускорение автомобиля на участке, м/с²

$$a_{\Delta t} = \frac{V_T - V_0}{\Delta t}, \quad (4.3)$$

где V_T – конечная скорость на участке, м/с; Δt – время прохождения участка, с.

Расчетный момент сопротивления качению, Нм

$$M_{\text{сопр.качению}} = f_k \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot r_k, \quad (4.4)$$

где f_k – коэффициент сопротивления качению; m – масса автомобиля, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; α – угол наклона трассы, рад.

Расчетный момент сопротивления подъему, Нм

$$M_{\text{сопр.подъему}} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot r_k.$$

Расчетный момент сопротивления потоку воздуха, Нм

$$M_{\text{сопр.воздуха}} = 0,5 \cdot k_{\text{лс}} \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot A \cdot \left(\frac{V_T + V_0}{2} \right)^2 \cdot r_k, \quad (4.5)$$

где $k_{\text{лс}}$ – коэффициент лобового сопротивления; $\rho_{\text{возд}}$ – удельная плотность воздуха; A – площадь лобового сопротивления автомобиля.

Суммарный статический момент сопротивления, Нм

$$M_{\text{РОСТ}} = M_{\text{сопр.качению}} + M_{\text{сопр.подъему}} + M_{\text{сопр.воздуха}}. \quad (4.6)$$

Момент инерции движущихся частей, кг · м²

$$J_{\text{РО}} = J + m \cdot r_k^2, \quad (4.7)$$

где J – момент инерции трансмиссии, кг · м²;

Динамический момент автомобиля, Нм

$$M_{\text{РОДИН}} = J_{\text{РО}} \frac{2 \cdot a_{\Delta t}}{2 \cdot r_k}. \quad (4.8)$$

Суммарный момент на колесах, Нм

$$M_{\text{РО}} = M_{\text{РОСТ}} + M_{\text{РОДИН}}. \quad (4.9)$$

Приведенный статический момент, (Н · м)

$$M_{\text{ПР}} = \frac{M_{\text{РОСТ}}}{j_p \cdot \eta_p} \quad (\text{Н} \cdot \text{м}), \quad (4.10)$$

где j_p – передаточное число редуктора; η_p – КПД редуктора мотор-колеса.

Приведенный момент инерции движущихся частей, кг · м².

$$J_{\text{ПР}} = \frac{J_{\text{РО}}}{j_p^2}. \quad (4.11)$$

Приведенный момент инерции движущихся частей с учетом инерции ротора двигателя, кг · м²

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{пр}}. \quad (4.12)$$

Приведенный динамический момент, Нм

$$M_{\text{ДИН}} = J \frac{2 \cdot a_{\Delta t} \cdot j_p}{D}. \quad (4.13)$$

Суммарный приведенный момент, Нм

$$\Sigma M_{\text{прив}} = M_{\text{ПР}} + M_{\text{ДИН}}. \quad (4.14)$$

Момент непосредственно на валу одного двигателя, Нм

$$M_{\text{прив на 1 двигатель}} = \frac{\Sigma M_{\text{прив}}}{N_{\text{колес}}}, \quad (4.15)$$

где $N_{\text{колес}}$ – количество мотор-колес в электротрансмиссии.

Расчет параметров ВЭКВ

Магнитное сопротивление воздушного зазора, 1/Гн

$$R_{\delta} = \frac{2 \cdot \delta_{\text{зазор}} \cdot k_{\delta}}{\mu_0 \cdot S_{\text{п}}}, \quad (4.16)$$

где $\delta_{\text{зазор}}$ - величина рабочего воздушного зазора, м; k_{δ} - коэффициент воздушного зазора, учитывающий увеличение эквивалентного воздушного зазора за счет зубчатости; μ_0 - магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; $S_{\text{п}}$ - площадь поверхности полюса электродвигателя, м².

Сопротивление магнитной цепи, 1/Гн

$$\Sigma R = R_{\delta} \cdot k_{\mu}, \quad (4.17)$$

где k_{μ} - коэффициент насыщения магнитной цепи.

Намагничивающая сила двух постоянных магнитов магнитной цепи, А

$$F_{\text{маг}} = 2 * H_m \cdot h_{\text{маг}}, \quad (4.18)$$

Где H_m - коэрцитивная сила материала постоянного магнита, А/м;

$h_{\text{маг}}$ - высота магнита по направлению намагничивания, м.

Магнитное сопротивление двух постоянных магнитов магнитной цепи

$$R_{\text{маг}} = \frac{2 \cdot H_c \cdot h_{\text{маг}}}{Br \cdot S_{\text{п}}}, \quad (4.19)$$

где Br - остаточная индукция материала постоянного магнита, Тл.

Магнитный поток от постоянных магнитов, Вб

$$\Phi_{\text{маг}} = \frac{F_{\text{маг}}}{\Sigma R + R_{\text{маг}}}. \quad (4.20)$$

Ток в обмотке возбуждения (ток возбуждения), А

$$I_{\text{ОВ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{r_{\text{ОВ}}}, \quad (4.21)$$

где $U_{\text{НОМ}}$ - номинальное напряжение аккумуляторной батареи; $r_{\text{ОВ}}$ - активное сопротивление обмотки возбуждения.

Намагничивающая сила обмотки возбуждения, А

$$F_{\text{ОВ}} = I_{\text{ОВ}} \cdot \omega_{\text{ОВ}}, \quad (4.22)$$

где $\omega_{\text{ОВ}}$ - число витков обмотки возбуждения.

Магнитный поток от обмотки возбуждения, Вб

$$\Phi_{\text{ОВ}} = \frac{F_{\text{ОВ}}}{\Sigma R}. \quad (4.23)$$

Суммарный магнитный поток, Вб

$$\Sigma\Phi = \Phi_{\text{маг}} \cdot \Phi_{\text{ОВ}}. \quad (4.24)$$

ЭДС фазы обмотки статора

$$E = 4,44 \cdot k_{\text{об}} \cdot \Sigma\Phi \cdot \omega_1 \cdot p \cdot \left(\frac{n_T + n_0}{2 \cdot 60} \cdot j_p \right), \quad (4.25)$$

где $k_{\text{об}}$ - обмоточный коэффициент якорной обмотки; ω_1 - число витков фазы обмотки статора; p - число пар полюсов.

Требуемый (расчетный) ток статора, А

$$I_{\text{треб}} = \frac{M_{\text{прив на 1 двигатель}}}{C_E \cdot \Sigma\Phi}, \quad (4.26)$$

где C_E – машинная постоянная электродвигателя.

$$C_E = \frac{p \cdot \left(\frac{Z \cdot u_{\text{п}}^2}{3} \right)}{\pi \cdot a}. \quad (4.27)$$

Требуемое напряжение питания двигателя

$$U_{\text{пит}} = E \cdot (\sqrt{2} \cdot k_d) + |2 \cdot I_{\text{треб}} \cdot r_{a75}|, \quad (4.28)$$

где k_d – отношение амплитуды выпрямленного напряжения к амплитудному значению фазного напряжения; r_{a75} - активное сопротивление нагретой фазы при температуре 75 °С.

Так как ток якорной цепи может быть отрицательным, а падение напряжения всегда суммируется с противо-ЭДС, то величина падения напряжения в якорной цепи взята по абсолютной величине.

Расчет энергетических характеристик ВЭКД

Электрические потери в обмотке якоря, Вт

$$P_{\text{эл}} = I_{\text{ном}}^2 \cdot r_{a75} \cdot (m - 1), \quad (4.29)$$

где m - число фаз ВЭКД (формула учитывает, что при 120-градусной коммутации в единицу времени одна фаза отключена).

Электрические потери в обмотке возбуждения, Вт

$$P_{\text{ОВ}} = I_{\text{ОВ}}^2 \cdot r_{\text{ОВ}}. \quad (4.30)$$

Так как магнитные потоки от постоянных магнитов и обмотки возбуждения не пересекаются в зубцовой зоне, то необходимо магнитные потери считать отдельно.

Магнитные потери в зубцах от потока постоянных магнитов, Вт

$$P_{ZПМ} = k_{дз} \cdot \rho_{50} \cdot B_{ZПМ}^2 \cdot \left(\frac{n_T + n_0}{2 \cdot 60} \cdot j_p \cdot p \right)^{1.3} \cdot \frac{m_Z}{2}, \quad (4.31)$$

где $k_{дз}$ - технологический коэффициент увеличения магнитных потерь в зубцах; ρ_{50} - удельные потери в стали, Вт/кг; $B_{ZПМ}$ - индукция в зубцах от потока постоянных магнитов, Тл; m_Z - масса зубцов.

Магнитные потери в зубцах от потока обмотки возбуждения, Вт.

$$P_{ZОВ} = k_{дз} \cdot \rho_{50} \cdot B_{ZОВ}^2 \cdot \left(\frac{n_T + n_0}{2 \cdot 60} \cdot j_p \cdot p \right)^{1.3} \cdot \frac{m_Z}{2}, \quad (4.32)$$

где $B_{ZОВ}$ - индукция в зубцах от потока постоянных магнитов, Тл.

Магнитные потери в спинке якоря от потока постоянных магнитов, Вт.

$$P_{аПМ} = k_{да} \cdot \rho_{50} \cdot B_{аПМ}^2 \cdot \left(\frac{n_T + n_0}{2 \cdot 60} \cdot j_p \cdot p \right)^{1.3} \cdot \frac{m_a}{2}, \quad (4.33)$$

где $k_{да}$ - технологический коэффициент увеличения магнитных потерь в спинке якоря; m_a - масса спинки якоря. $B_{аПМ}$ - индукция в спинке якоря от потока постоянных магнитов, Тл.

Магнитные потери в спинке якоря от потока обмотки возбуждения, Вт.

$$P_{аОВ} = k_{да} \cdot \rho_{50} \cdot B_{аОВ}^2 \cdot \left(\frac{n_T + n_0}{2 \cdot 60} \cdot j_p \cdot p \right)^{1.3} \cdot \frac{m_a}{2}, \quad (4.34)$$

где $B_{аОВ}$ - индукция в спинке якоря от потока обмотки возбуждения, Тл.

Суммарные магнитные потери, Вт.

$$P_{маг} = P_{ZПМ} + P_{ZОВ} + P_{аПМ} + P_{аОВ}. \quad (4.35)$$

Добавочные потери, Вт.

$$P_{доб} = 0,005 \cdot U_{ном} \cdot I_{ном}. \quad (4.36)$$

Суммарные потери, Вт.

$$\sum P = P_{эл} + P_{ОВ} + P_{маг} + P_{мех} + P_{доб}, \quad (4.37)$$

где $P_{мех}$ - механические потери в двигателе.

Расчет коэффициента полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{U_{ном} \cdot I_{ном}}. \quad (4.38)$$

Нагрев электродвигателя рассчитывается по методике параграфа 3.3. В качестве характеристики нагрева выводится температура обмотки якоря.

4.2 Блок-схема алгоритма управления ВЭКВ

На рисунке 4.2.1 представлена блок-схема алгоритма управления ВЭКВ. Опишем его основные функциональные блоки. На начальном этапе считывается вся информация, необходимая для расчета статических и динамических моментов трансмиссии. Дистанция трассы разбивается на отдельные участки. На каждом участке прогнозируется средняя скорость движения. Эта скорость определяет время прохождения данного участка. Этот период времени делится на 100 интервалов. При таком делении можно считать, что средняя скорость элементарного участка близка к мгновенной скорости. Далее определяется ускорение на элементарном участке. По этому ускорению определяется конечная скорость в конце элементарного участка. Этих данных достаточно для определения статического, динамического и суммарного момента на элементарном участке. Таким образом, на данном этапе алгоритма имеется информация о частоте вращения электродвигателя и моменте, который он должен преодолеть.

Далее алгоритм переходит к определению параметров и характеристик электродвигателя. Первоначально определяется результирующий магнитный поток электродвигателя, который должен обеспечить баланс между напряжением источника питания, ЭДС вращения и падением напряжения в якорной цепи. Поскольку магнитный поток от постоянных магнитов остается неизменным, этот баланс обеспечивается током обмотки возбуждения и, соответственно, магнитным потоком от обмотки возбуждения.

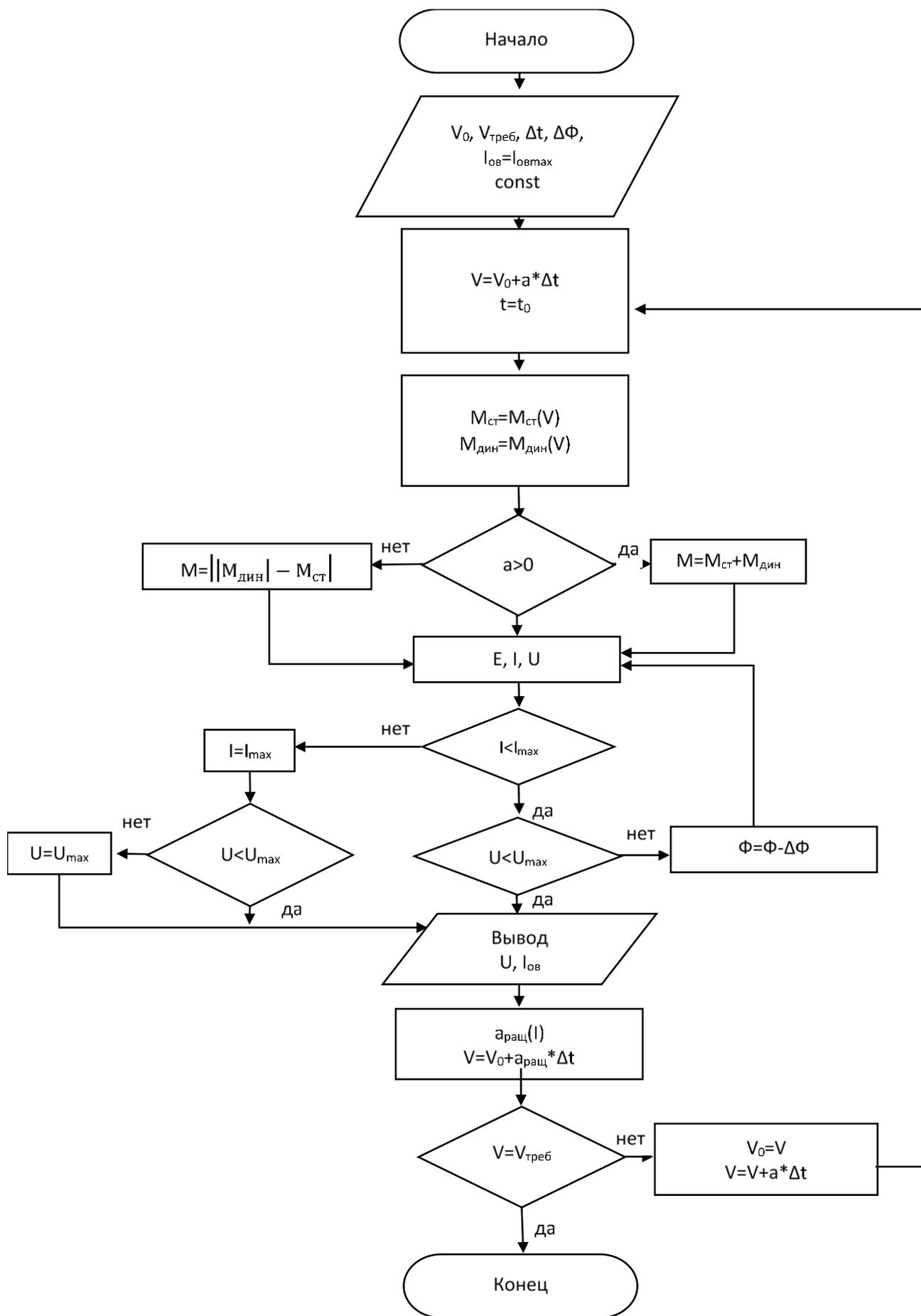


Рисунок 4.2.1 - Блок-схема алгоритма управления ВЭКВ

Баланс напряжений будет в любой ситуации достигнут, так как ток обмотки возбуждения может менять знак, и за счет этого суммарный магнитный поток можно теоретически уменьшить до нуля.

При низкой частоте вращения этот баланс можно достичь за счет снижения напряжения питания электродвигателя практически до нуля.

Далее по алгоритму определяется ток якоря, создающий необходимый крутящий момент, для преодоления суммарного статического и динамического моментов сопротивления. Этот ток заведомо меньше тока короткого замыкания и может быть достигнут, если в системе нет токоограничения по цепи якоря. Если требуемый по балансу моментов якорный ток максимально допустимый ток, то алгоритм переходит в режим токоограничения. При этом ток якоря фиксируется на уровне максимально допустимого по условиям ограничения тока якоря. Пересчитывается максимально возможный момент, который в этих условиях может создать электродвигатель, определяется новое значение динамического момента, пересчитывается частота вращения электродвигателя и скорость движения транспортного средства. Понятно, что в этой ситуации транспортное средство будет двигаться с меньшей скоростью чем та, которая запланирована. Новые параметры движения фиксируются. Алгоритм переходит на заключительный этап работы.

В заключительном блоке алгоритма определяются электрические (в обмотке якоря и обмотке возбуждения) потери, магнитные потери в зубцах якоря и в спинке якоря, добавочные и механические потери. При этом учитывается изменение потока от обмотки возбуждения при изменении частоты вращения электродвигателя. Параметры элементарных участков суммируются в интегральные характеристики и параметры электродвигателя и электротрансмиссии за счет циклов, суммирующих показатели элементарных участков. Алгоритм был реализован в программной среде Delphi для моделирования работы ВЭКВ в составе электротрансмиссии при движении электромобиля по заданной трассе.

В алгоритме предусмотрено измерение следующих 15 мгновенных значений электротрансмиссии в целом и конкретно ВЭКВ:

- проходимая транспортным средством дистанция;
- скорость транспортного средства;
- ускорение транспортного средства;
- ток возбуждения ВЭКВ;
- ток якоря ВЭКВ;
- напряжение питания ВЭКВ;
- момент на валу ВЭКВ;
- частота вращения ВЭКВ;
- температура нагрева ВЭКВ;
- суммарный момент электротрансмиссии;
- потребляемая электротрансмиссией мощность;
- мощность на валу ВЭКВ;
- общие потери ВЭКВ;
- затрачиваемая электроэнергия электротрансмиссией при движении по трассе;
- затрачиваемая АКБ емкость $A \cdot ч$ с учетом рекуперации.

Работоспособность алгоритма показана ниже на конкретном примере.

Данный алгоритм может быть использован для программирования микроконтроллера реальной системы управления транспортным средством.

4.3 Проверка алгоритма управления ВЭКВ при движении цифрового двойника электроболида по трассе

Для проверки достоверности и работоспособности алгоритма управления ВЭКВ в различных дорожных ситуациях было принято решение испытать его на конкретной гоночной трассе.

В качестве ВЭКВ был выбран электродвигатель, спроектированный для мотор-колеса электроболида, участие которого планируется в международной программе Формула студент.

В качестве исходных данных для расчета были выбраны параметры, представленные на рисунке 4.3.1.

Параметры автомобиля											
Масса автомобиля, кг	100	Передаточное число редуктора	10	Аэродин.коэф.лобового сопр.	0.5	Площадь лобового сопротивления, м ²	1.6	КПД трансмиссии	0.9	Коэф.сопротивления качению	0.015
Коэф. качению шины от скорости	0.00051	Коэф. сопр. кач.от скорости	0.021	Диаметр колеса, м	0.33	Сум. момент инерции привода, кг*м ²	2.209	Момент инерции ротора ЭД, кг*м ²	0.0258	Число мотор-колес в приводе	2
Температура охлаждающего агента, Град Ц	20										
Параметры электродвигателя комбинированного возбуждения											
Ном. напряжение питания, В	72	Максимально допустимый ток, А	1000	Коэффициент выпрямления	1.654	Число пар полюсов	8	Высота магнита, м	0.004	Коэф. полюсной дуги	0.68
Воздушный зазор, м	0.001	Обмоточный коэффициент	0.98	Коэффициент воздушного зазора	1.418	Коэффициент насыщения	1.485	Постоянная момента	81.487	Коэф. магн. потерь в зубцах	5.2
Коэф. магн. потерь в спинке	1.95	Число зубцов	48	Площадь поверхности полюса, м ²	0.0007	Число витков в фазе	8	Активное сопротивление обм.ак, Ом	0.00057	Число витков обмотки возбуждения	787
Активное сопр. обм. возбуждения, Ом	23	Остаточная индукция ПМ, Тл	1.1	Коррцитивная сила ПМ, А/м	890000	Масса зубцов, кг	1.9	Масса спинки, кг	2.5	Масса Электродвигателя, кг	20
Удельные потери в стали, Вт/кг	3.5	Площадь радиатора, м ²	0.432	Удельная теплоемкость ЭД, Дж/(кг*гр)	430	Удельная теплоотдача ЭД, Дж/(м ² *гр)	148				

Рисунок 4.3.1 - Исходные данные для программы расчета движения электротрансмиссии на основе мотор-колеса с ВЭКВ

В качестве маршрута движения была выбрана реальная гоночная трасса, предназначенная для гоночных соревнований Формула студент. Траектория гоночной трассы представлена на рисунке 4.3.2.

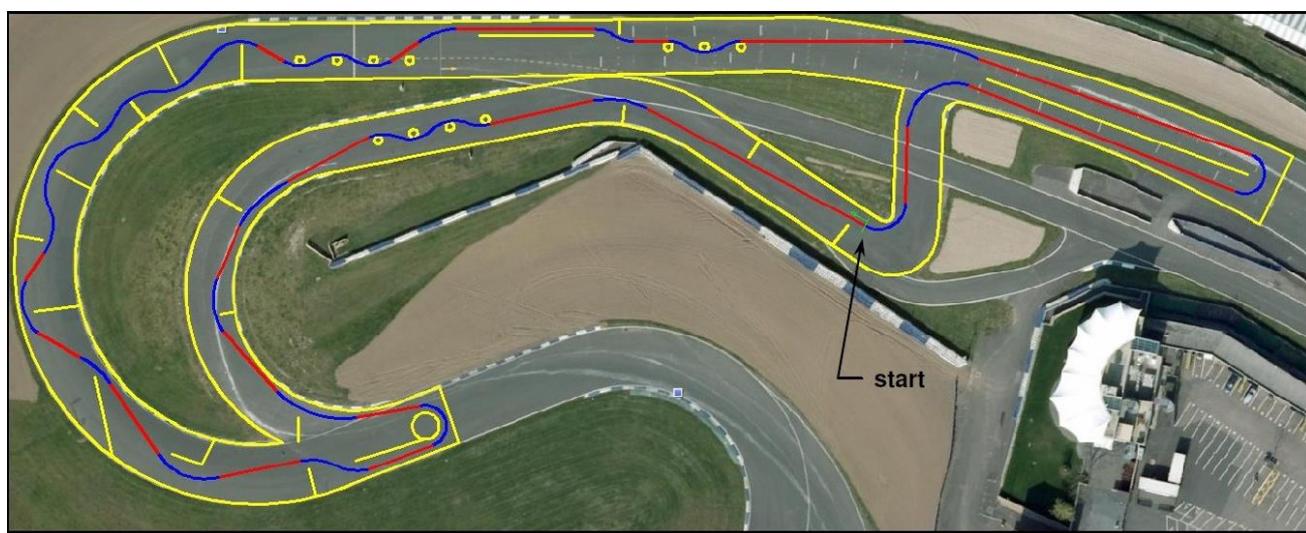


Рисунок 4.3.2 - Траектория гоночной трассы

Данная трасса была разбита на 56 участков. На каждом участке была задана средняя скорость движения.

Разбиение трассы на участки с дистанциями участков, средней скоростью и наклоном участков трассы представлено на рисунке 4.3.3.

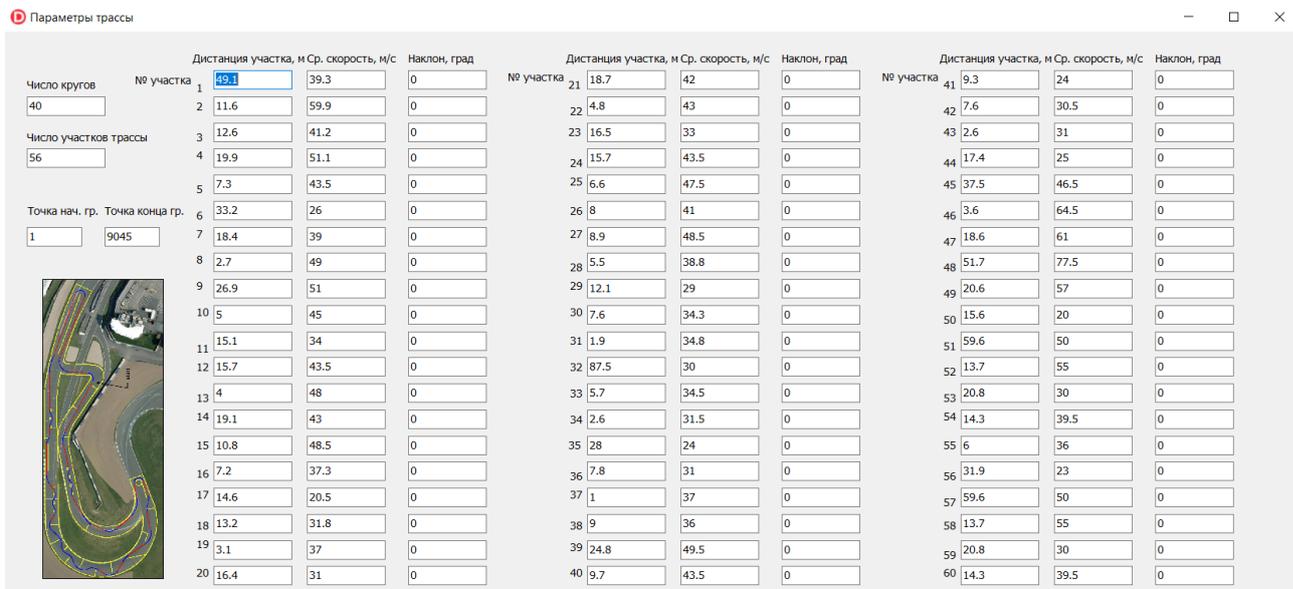


Рисунок 4.3.3 - Разбиение трассы на участки с указанием дистанции, средней скорости и уклонов.

Программа предусматривает прогон транспортного средства по трассе по любому заранее заданному числу кругов.

Ниже представлены результаты расчета при прохождении электроболитом четырех полных кругов по трассе. При движении электроболита в систему было заложено токоограничение 1000А.

На рисунках 4.3.4-4.3.5 представлены характеристики электродвигателя при движении по трассе при прохождении четырех кругов.

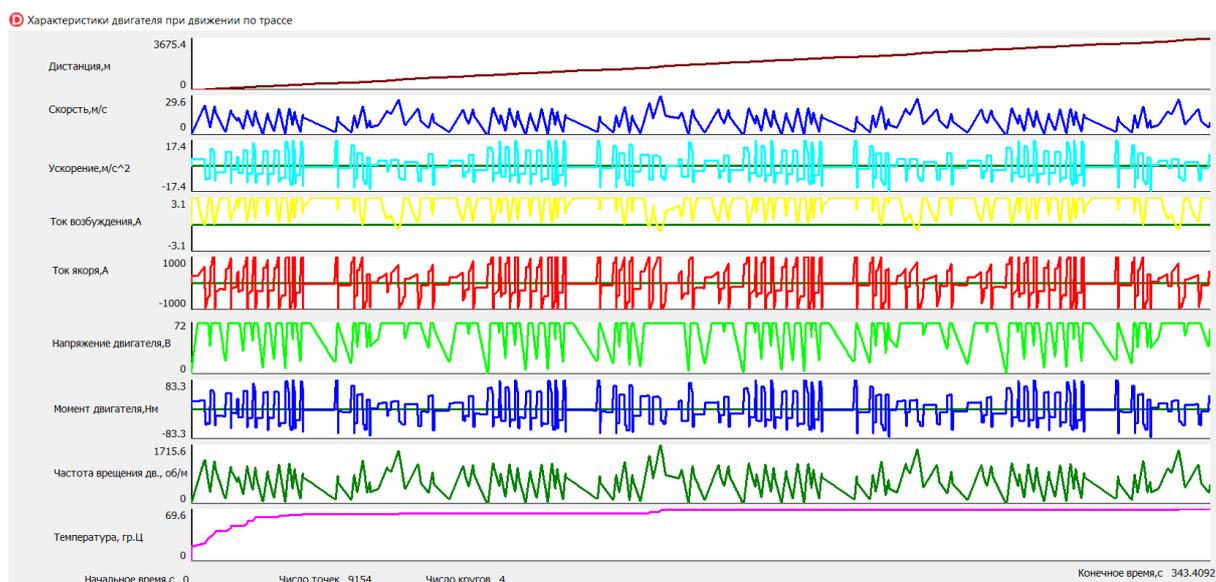


Рисунок 4.3.4 - Характеристики электродвигателя при движении по трассе

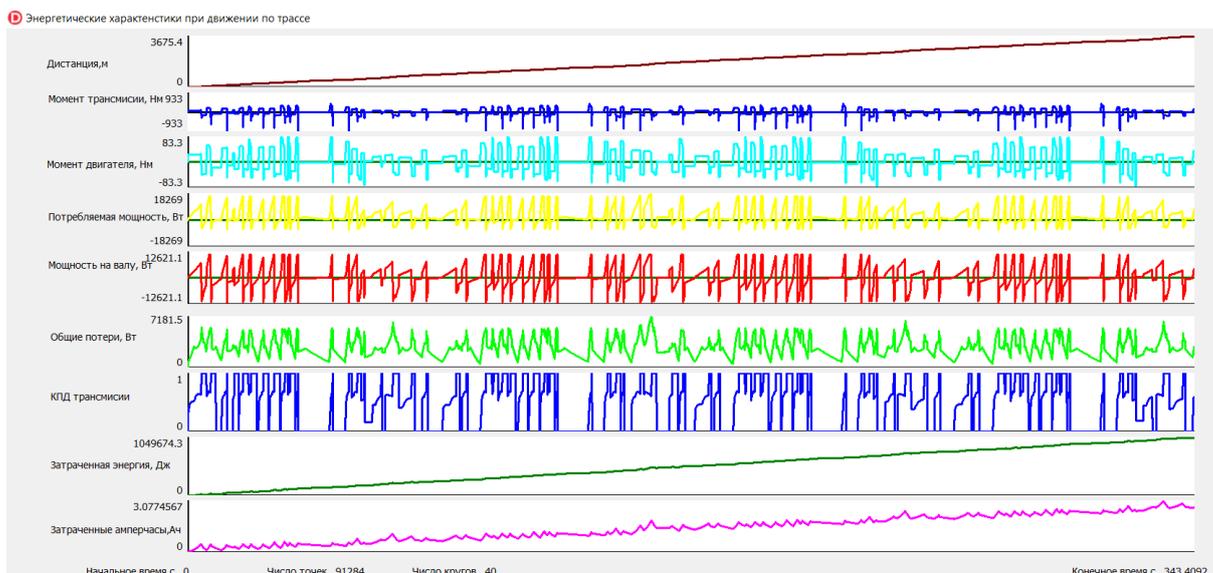


Рисунок 4.3.5 - Энергетические характеристики при прохождении электроболлидом четырех кругов трассы

На графиках очень хорошо видно, что при движении электроболлида по трассе с различными скоростными режимами при токоограничении достаточно двух каналов управления, чтобы обеспечить требуемый диапазон по частоте вращения электродвигателя и электромагнитному моменту.

С точки зрения энергопотребления и нагрева представляют интерес характеристики длительного режима эксплуатации электроболлида.

На рисунке 4.3.6. показаны характеристики электродвигателя при прохождении электроболлидом полной программы соревнований 40 кругов трассы.

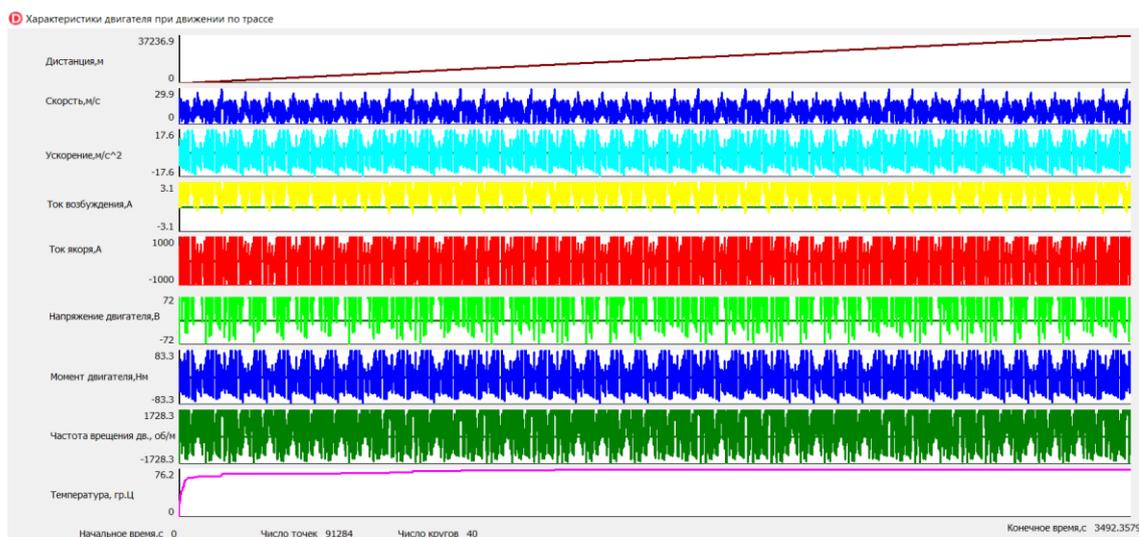


Рисунок 4.3.6 - Характеристики электродвигателя при прохождении электроболлидом 40 кругов трассы

На рисунке 4.3.7 показаны энергетические характеристики электротрансмиссии при прохождении электроболидом 40 кругов трассы.

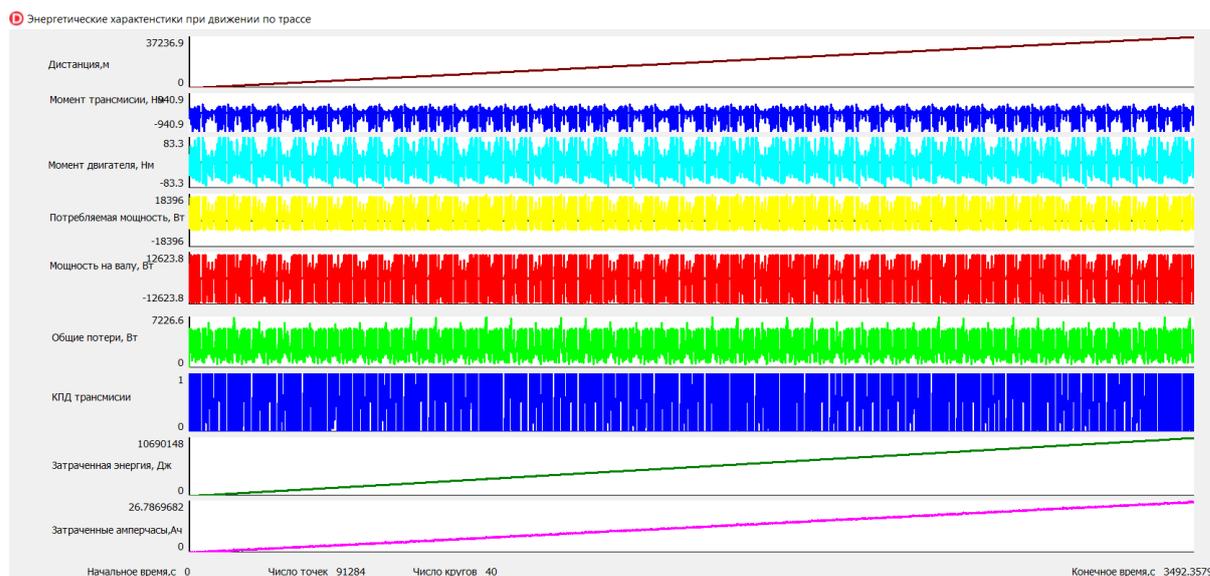


Рисунок 4.3.7 - Энергетические характеристики электротрансмиссии при прохождении электроболидом 40 кругов трассы

Графики рисунка 4.3.6 показывают, что при длительной эксплуатации около одного часа, система охлаждения электродвигателя справляется со своими функциональными обязанностями. Температура нагрева обмотки якоря не превышает 76.2°C , что вполне допустимо.

Графики рисунка 4.3.7 показывают, что при прохождении полной соревновательной трассы (40 кругов), емкости АКБ равной $100 \text{ А}\cdot\text{ч}$ с учетом рекуперации в нее энергии торможения вполне хватит для прохождения полного маршрута.

Данный алгоритм и программа представляют собой научную новизну и интеллектуальную собственность. На программу оформлено Свидетельство о регистрации программы в Федеральном институте промышленной собственности.

Выводы по главе 4

1. Представлена математическая модель электротрансмиссии, которая учитывает статические и динамические моменты сопротивления при движении

транспортного средства. Математическая модель включает в себя как характеристики транспортного средства, так и характеристики электродвигателя.

2. Разработан алгоритм эффективного управления ВЭКВ, который учитывает возможность управления мотор-колесом транспортного средства как по силовой цепи якоря, так и по слаботочной цепи возбуждения, что позволяет изменять частоту вращения и момент на валу в широких пределах.

3. На базе алгоритма управления разработана математическая модель, которая составила основу программы, позволяющей провести цифровое испытание транспортного средства при прохождении им конкретной трассы. Программа позволяет контролировать 16 параметров электродвигателя и транспортного средства.

5 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА МОТОР-КОЛЕСА НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

5.1 Проектирование макетного образца мотор-колеса

Созданная проектная система позволяет проектировать ВЭКВ для мотор-колес с различными выходными характеристиками и, как следствие, с различными массогабаритными показателями. Данный факт позволяет в условиях современного производства разрабатывать сразу несколько модельных рядов с различными характеристиками.

В рамках данного диссертационного исследования для верификации разработанной проектной системы было принято решение разработать макетный образец мотор-колеса по конкретному ТЗ (см. таблицу 5.1).

Таблица 5.1 – Техническое задание

№ п/п	Наименование параметра	Численное значение
1	Максимальные обороты вала колеса	1600 об/мин
2	Максимальный крутящий момент колеса	450 Нм
3	Передаточное отношение понижающего редуктора	1:10
4	Охлаждение	жидкостное
5	Рабочий диапазон напряжений	60 – 80 В
6	Потребляемая мощность от АКБ на колесо, не более	35 кВт
7	Максимальный ток для силовых ключей коммутатора	1000 А
8	Наружный диаметр ограничивается размером колесного диска	
9	Осевой размер определяется в процессе разработки	
10	Масса электродвигателя в сборе уточняется в процессе разработки	

Данное ТЗ было сформировано в рамках подготовки гоночной команды ЮУрГУ (НИУ) к международным соревнованиям Формула студент.

Формула студент – это международное соревнование гоночных команд. Соревнования проходят в различных классах, в том числе и на электроболидах. Большое внимание в ходе данных соревнований уделяется именно конструкции гоночного болида. Инновационность, технологичность и безопасность в сочетании с высокими результатами, полученными на гоночном треке, позволяют командам конкурировать на высоком уровне.

Для реализации полученного технического задания с помощью разработанной проектной системы были получены основные размеры активных частей ВЭКВ. По полученным значениям была разработана 3D-модель мотор-колеса.

Исходя из полученных размеров диаметра расточки статора, общей и активной длины машины, размеров пазовозубцовой зоны была разработана 3D-модель статора ВЭКВ (см. рисунок 5.1.1).

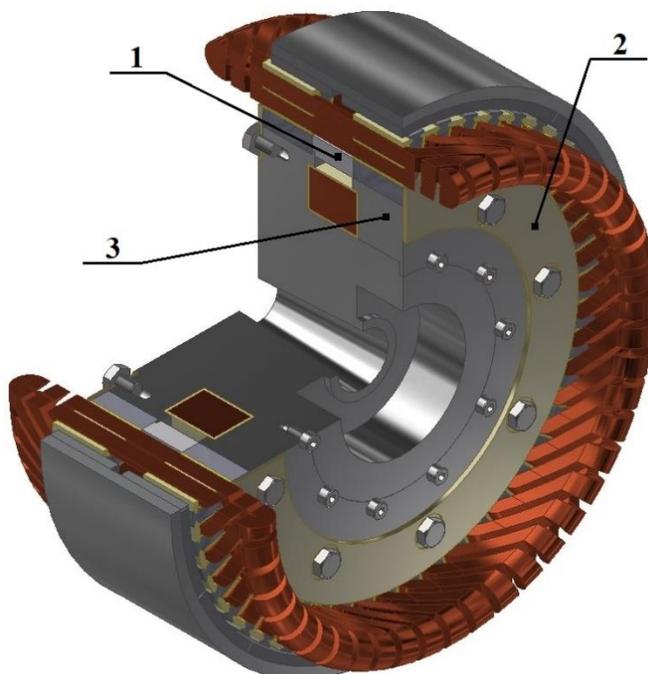


Рисунок 5.1.1. - 3D-модель статора ВЭКВ

Отличительной особенностью данной конструкции является возможность замены обмотки возбуждения без полной разборки двигателя. Фиксация обмотки возбуждения осуществляется с помощью детали - позиция 3. Даная особенность

повышает ремонтпригодность двигателя, так как замена обмотки возбуждения возможна независимо от обмотки статора.

Для исключения паразитных магнитных потоков между пакетами статора необходимо создать промежуток с низкой магнитной проницаемостью, при этом надежно зафиксировав пакеты шихтованного железа. Данную функцию выполняет текстолитовая вставка - позиция 1. Фиксация пакетов статора по наружным торцам осуществляется с помощью кольца - позиция 2.

Ротор ВЭКВ имеет консольное крепление, что позволяет сократить общую длину двигателя и обеспечивает надежное и эргономичное крепление ВЭКВ к элементам подвески (см. рисунок 5.1.2).

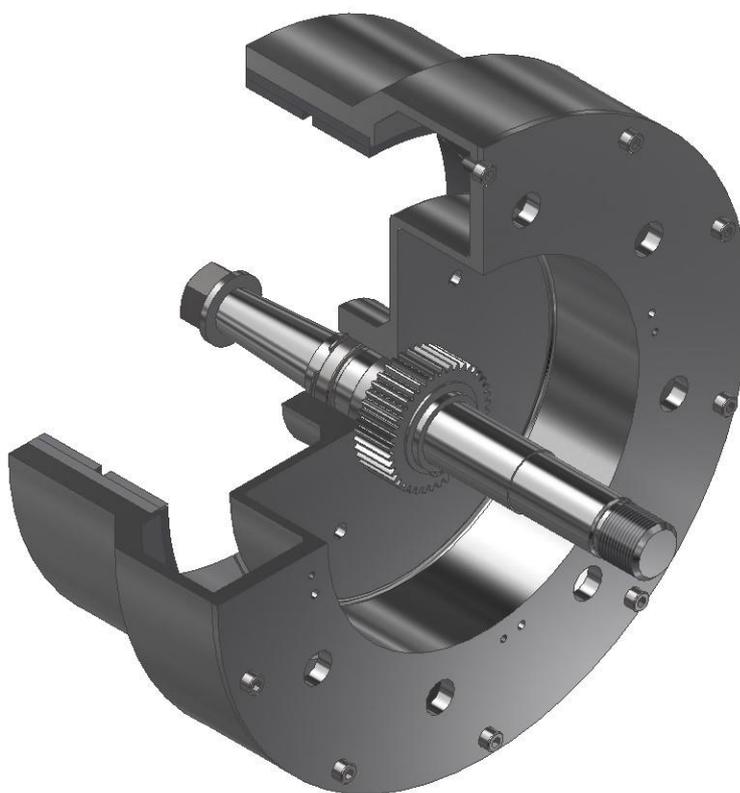


Рисунок 5.1.2. - 3D-модель ротора ВЭКВ

Результаты моделирования и мировая практика свидетельствуют о том, что для обеспечения высоких массогабаритных характеристик необходимо использовать электродвигатель в паре с понижающим редуктором. В рамках данного диссертационного исследования было принято решение использовать встроенный планетарный редуктор с двухвенцовыми сателлитами (см. рисунок 5.1.3). Использование двухвенцовых сателлитов (см. рисунок 5.1.4) обусловлено малыми

габаритами редуктора и высоким передаточным числом 1:10. Для обеспечения минимальных линейных размеров двигателя планетарный редуктор бы закреплен непосредственно на роторе двигателя.

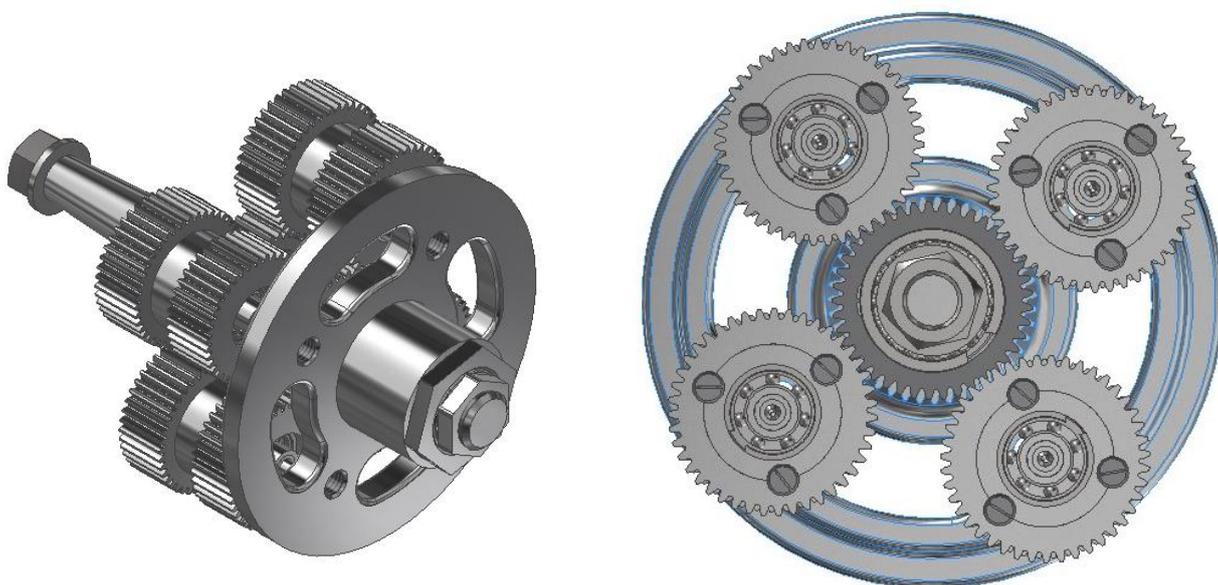


Рисунок 5.1.3 - Встроенный планетарный редуктор

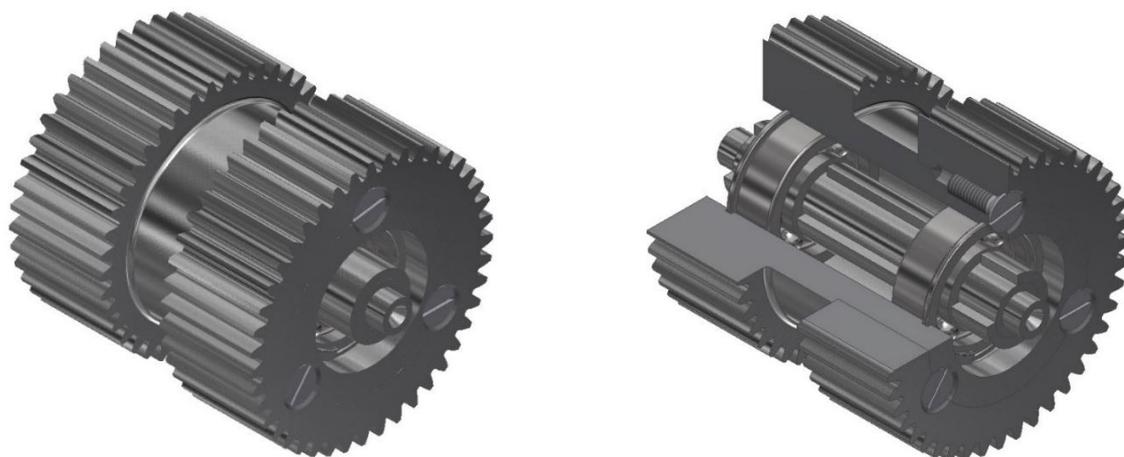


Рисунок 5.1.4 - 3D-модель двухвенцового сателлита

В рамках данного диссертационного исследования для обеспечения работоспособности редуктора была использована консистентная смазка, также в данной конструкции возможно использовать другие типы систем смазки.

Роль рабочего (выходного) конца в представленной конструкции выполняет ступица колеса (см. рисунок 5.1.5). Конструкция ступицы позволяет располагать присоединительные отверстия для крепления диска колеса любым известным

образом в зависимости от требований ТЗ. Данный факт позволяет использовать любые стандартные колесные диски (см. рисунок 5.1.6).

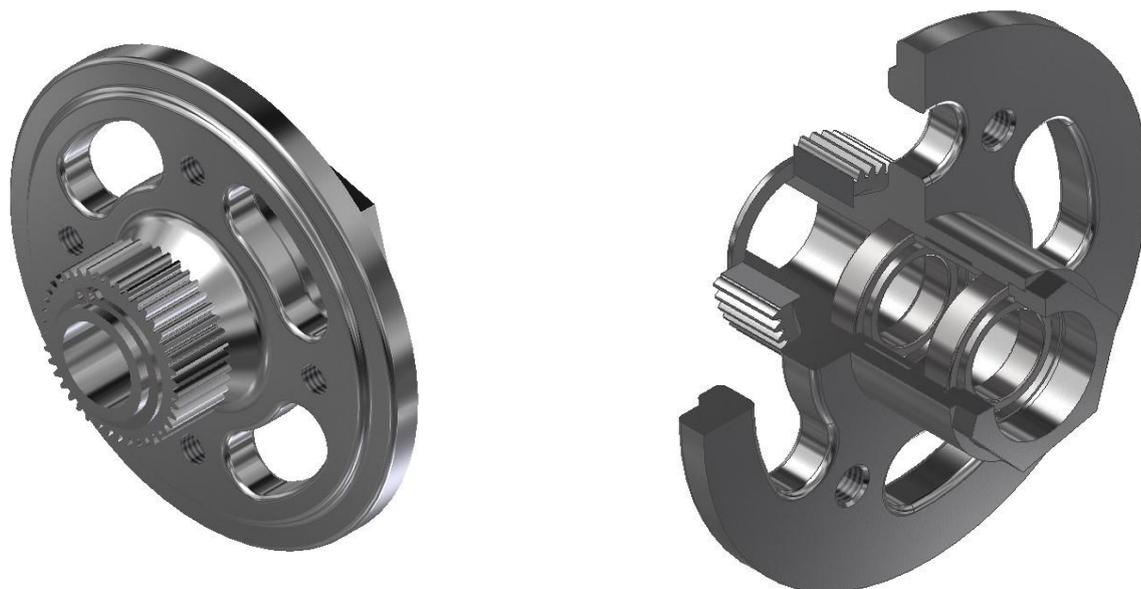


Рис.5.1.5 - 3D-модель ступицы мотор-колеса

За счет детальной проработки конструкции мотор-колеса (см. рисунок 5.1.7) сборка и разборка мотор-колеса не требует специальных навыков и инструментов, что делает разработанное мотор-колесо технологичным при производстве и ремонтпригодным при эксплуатации. Представленный макетный образец рассчитан под стандартный колесный диск R14.

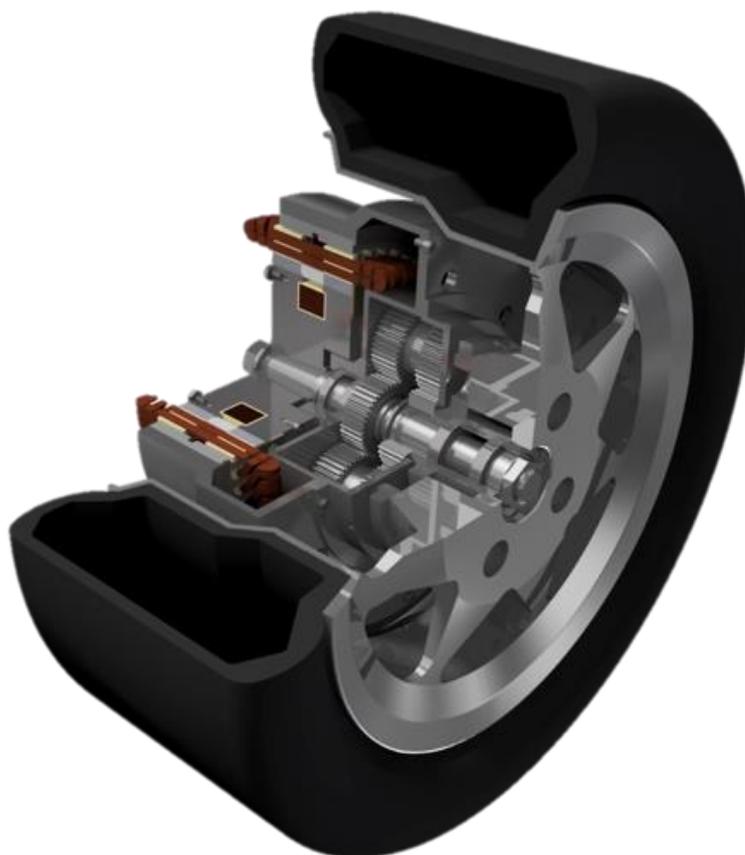


Рис.5.1.6 - 3D-модель мотор-колеса в сборе

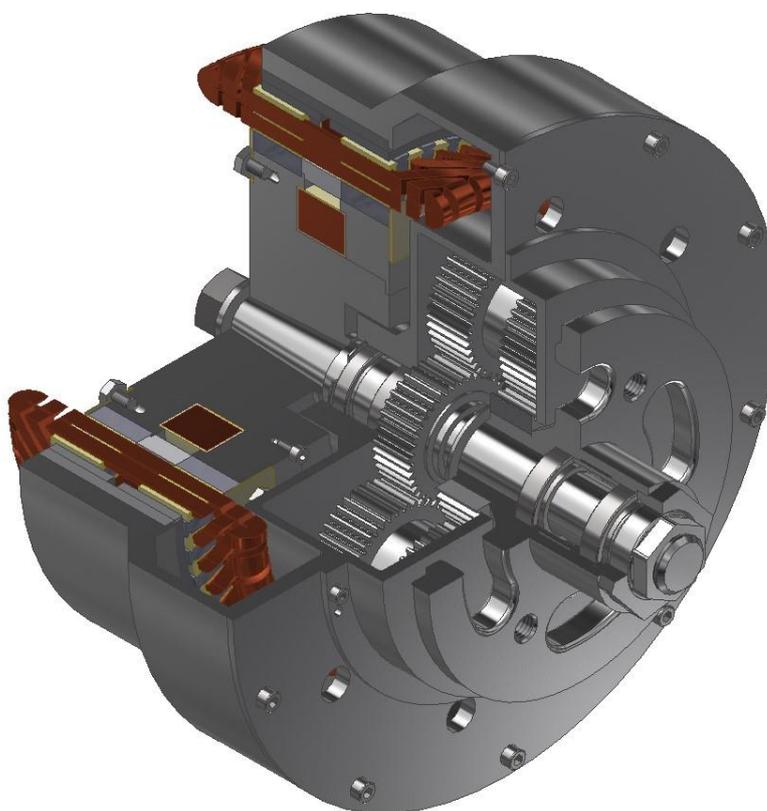


Рис.5.1.7 - 3D-модель ВЭКВ в сборе

После разработки 3D-модели был изготовлен макетный образец в масштабе 1:2. Макетный образец позволил проверить собираемость изделия и работоспособность встроенного планетарного редуктора. Пластиковый макетный образец на 90% состоит из деталей, напечатанных на 3D-принтере (рисунок 5.1.8), остальные 10% - это метизы и стальные детали, изготовленные на токарном станке. Благодаря подбору оптимальных режимов печати удалось достигнуть точности печати $\pm 0,02$ мм. Высокая точность печати позволила ускорить сборку макетного образца и обеспечить идентичные механические взаимодействия, как на реальном макетном образце (см. рисунок 5.1.9).



Рисунок 5.1.8 - Процесс печати деталей макетного образца мотор-колеса



Рисунок 5.1.9 - Макетный образец мотор-колеса в масштабе 1:2

После проверки собираемости макетного образца и анализа получившейся конструкции в 3D-модель был внесен ряд конструктивных улучшений, которые позволили упростить процесс сборки ВЭКВ и увеличить надежность конструкции.

После корректировки в 3D-модели был разработан полный комплект конструкторской документации в соответствии с нормами ЕСКД.

Изготовление деталей и сборка мотор-колеса производились на мощностях НОЦ «Машиностроения» ЮУрГУ (см. рисунок 5.1.10).



Рисунок 5.1.10 - Процесс сборки пакетов статора

Наиболее ответственным и трудоемким является процесс формирования статорной обмотки (рисунок 5.1.11).



Рисунок 5.1.11 - Статор ВЭКВ с обмотками

Благодаря технологичной конструкции сборка мотор-колеса с ВЭКВ не требует специальных приспособлений и инструментов, что обеспечивает высокую надежность и ремонтпригодность (см. рисунок 5.1.12).



Рисунок 5.1.12 - Макетный образец мотор-колеса в сборе

5.2 Испытания макетного образца.

Для окончательной проверки корректности работы разработанной проектной системы были проведены натурные испытания макетного образца.

Для проведения испытаний была изготовлена фиксирующая штанга с основанием. Исходя из наличия в конструкции ВЭКВ обмотки возбуждения, было принято решение спроектировать и изготовить испытательный коммутатор, который позволяет наиболее эффективно использовать преимущества ВЭКВ (см. рисунок 5.2.1).

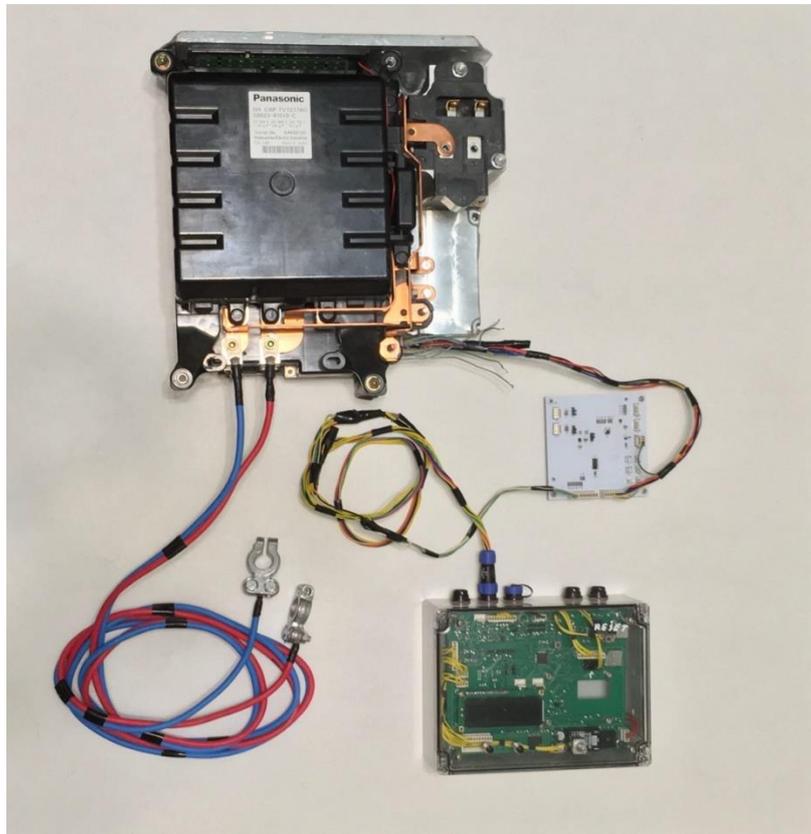


Рисунок 5.2.1 - Испытательный коммутатор

На первоначальном этапе испытаний был проведен внешний осмотр всех узлов мотор-колеса, было измерено сопротивление изоляции обмотки статора и обмотки возбуждения, после чего были проведены опыт холостого хода и короткого замыкания. Результаты опытов представлены в таблице 5.2. Стоит отметить, что данные результаты являются предварительными, так как получены путем пересчета с более низкого напряжения питания.

Таблица 5.2 – Результаты опытов

Наименование опыта	Результат испытаний	Расчетные данные
Сопротивление изоляции обмотки статора, МОм	>2 МОм	–
Сопротивление изоляции обмотки возбуждения, МОм	>2 МОм	–
Напряжение питания, В	76	76
Ток холостого хода, А	47,8	44,5
Скорость холостого хода, об/мин	15678	15896
Момент короткого замыкания, кНм	2,1	2,28

Полученные результаты испытаний показывают, что основные характеристики макетного образца мотор-колеса соответствуют расчетным, отклонение составило не более 10%.

Выводы по главе 5

1. На основе выходных данных проектной системы была разработана конструкция мотор-колеса, которая содержит вентильный электродвигатель комбинированного возбуждения с жидкостным охлаждением и планетарный редуктор с двухвенцовыми сателлитами. Разработанная конструкция может служить основой для массового производства и эксплуатации мотор-колес.

2. Разработана 3D-модель мотор-колеса с ВЭКВ, по которой был изготовлен полный комплект конструкторской документации в строгом соответствии с нормами ЕСКД.

3. Изготовлен имитационный образец мотор-колеса в масштабе 1:2, который позволил проверить собираемость изделия и работоспособность планетарного редуктора с двухвенцовыми сателлитами.

4. Изготовлен макетный образец мотор-колеса для гоночного электробицикла. Исследованы работоспособность и качество функционирования макетного образца мотор-колеса в различных режимах. Отклонение от расчетных параметров составляет не более 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании обоснована актуальность разработки электротрансмиссии для гибридного и электротранспорта, проведен анализ научной проработки исследуемой темы, определены задачи по разработке проектной системы синтеза и анализа вентильных электродвигателей комбинированного возбуждения для мотор-колес электромеханических трансмиссий транспортных средств на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации. На основе решенных в диссертации научных задач были получены следующие научные результаты:

1. На основе проведенного анализа существующих типов трансмиссий в качестве базового был выбран вариант мотор-колеса с встроенным вентильным двигателем комбинированного возбуждения и планетарным редуктором с двухвенцовыми сателлитами. Данное решение позволило сократить массу и габариты электротрансмиссии, разместив ее в объеме диска колеса.

2. Разработана методика и математическая модель расчета ВЭКВ на основе метода схем замещения. Приведена блок-схема алгоритма расчета по математической модели. Блок-схема алгоритма реализована в программной среде Delphi и включена в подсистему синтеза проектной системы. Данная модель позволяет сократить время расчета при сохранении точности определения основных параметров до 3-5 %.

3. Разработана система синтеза ВЭКВ на основе параметрической многоуровневой оптимизации. Для блока оптимизации выбран метод, который сочетает в себе метод покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя) при движении к оптимуму с методом Фибоначчи при определении шага. Для придания гибкости проектной системе сформировано несколько критериев, которые разработчик может выбирать в зависимости от особенностей проекта. Это позволяет реализовать до 8 проектных ситуаций в зависимости от технического задания заказчика - от полной габаритной оптимизации до поверочного расчета.

4. Разработана система анализа электромагнитного состояния с использованием имитационного моделирования в программной среде Ansys Electronics Desktop. Модель связана с системой синтеза через программный код, который передает параметры оптимальной геометрии в систему анализа. Компьютерная модель подключена к имитатору электронной системы управления, которая позволяет определять характеристики ВЭКВ в режиме реальных нагрузок. Данная модель представляет собой цифровой двойник реального электродвигателя, что позволяет снизить технические риски перед производством промышленного образца.

5. Разработана система жидкостного охлаждения ВЭКВ и математическая модель для нее, которая позволяет выполнить динамический анализ теплового состояния электродвигателя при различных режимах функционирования. Модель включена в проектную систему и позволяет контролировать нагрев ВЭКВ.

6. Разработан алгоритм эффективного управления ВЭКВ, который учитывает возможность управления мотор-колесом транспортного средства как по силовой цепи якоря, так и по слаботочной цепи возбуждения, что позволяет изменять частоту вращения и момент на валу в широких пределах. Данный алгоритм разработан на базе математической модели, которая составила основу программы, позволяющей провести цифровое испытание транспортного средства при прохождении им аналога реальной трассы. Программа позволяет контролировать 16 параметров электродвигателя и транспортного средства.

7. Разработана проектная система синтеза и анализа вентильного электродвигателя комбинированного возбуждения для мотор-колеса электромеханической трансмиссии транспортных средств на основе физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, параметрической многоуровневой оптимизации для заданных электромагнитных характеристик. Данная проектная система может составить научную основу для проектирования, создания и эксплуатации промышленного ряда электродвигателей данного типа.

8. На основе выходных данных проектной системы была разработана конструкция мотор-колеса, которая содержит вентильный электродвигатель комбинированного возбуждения с жидкостным охлаждением и планетарный редуктор с двухвенцовыми сателлитами. Изготовлен макетный образец мотор-колеса для гоночного электроболида. Исследованы работоспособность и качество функционирования макетного образца мотор-колеса в различных режимах. Отклонение от расчетных параметров составляет не более 10%.

В результате диссертационного исследования расширена научная и инженерная база по разработке электротрансмиссий транспортных средств.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки

Проведенные научные исследования по созданию электротрансмиссии транспортных средств можно развивать в следующих направлениях:

- дальнейшее развитие созданной проектной системы до уровня сквозной безбумажной технологии, включение в нее других модификаций вентильных электродвигателей комбинированного возбуждения, подсистемы проектирования встроенного редуктора;
- разработка системы управления всем транспортным средством, включая функции рекуперации при торможении, безрулевое управление за счет изменения скорости колес, электропитания от топливного элемента.
- разработка мощностного ряда электротрансмиссий для легкового и грузового гибридного и электротранспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтшуллер, Г. С. Введение в теорию решения изобретательских задач / Г. С. Альтшуллер. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986. - 235 с.
2. Аминов Д.С., Теоретические основы разработки водопогружных гидрогенераторов, используемых в качестве возобновляемых источников электроэнергии малых и средних рек. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2020 г.
<https://susu.antiplagiat.ru/report/bylink/apicorp/source/319262?v=1&source=59&userId=640&validationHash=C0873E01211382A9B343B68CC31F08FD62BED6F6>. Дата обращения 22.01.2023 г.
3. Ниматов Р.Р., Косимов Б.И. Комбинирования система бесперебойного питания на базе солнечных панелей, ветроэнергетической установки, гидрогенератора, аккумуляторной батареи и дизель-генератора. Десятая научная конференция Аспирантов и докторантов ЮУрГУ. Челябинск 2018.
4. Балагуров, В. А. Электрические машины с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ларионов. - М.: Энергия, 1964. - 480 с.
5. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя/К. А. Басов. - М.: ДМК Пресс, 2005. - 640 с.: ил.
6. Басов, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS/ К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2006. - 248 с.: ил.
7. Бертинов, А. И. Авиационные электрические генераторы/ А. И. Бертинов. - М.: Оборонгиз, 1959. - 594 с.
8. Бертинов, А. И. Электрические машины авиационной автоматики / А. И. Бертинов. - М.: Оборонгиз, 1961. – 428 с.
9. Беспалов, В. Я. Асинхронные машины для динамических режимов работы: (вопросы теории, математического моделирования и разработки): дис. док. тех. наук. 05.09.01 / В. Я. Беспалов. - М., 1992. – 317 с.
10. Беспалов, В. Я. Электрические машины / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. - М.: Академия, 2006. - 320 с.

11. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф., Ежов Е.В. Способ и устройство синхронизации возбужденного синхронного генератора с сетью // Электричество, 2014г.-№4. - С. 50-54.
12. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Способ синхронизации возбужденного синхронного генератора с сетью // Патент РФ № 2494513, Бюл. №27, 2013.
13. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Сравнение асинхронного и синхронного генераторов в системе рекуперации давления // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XVIII междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 3-х т. - М.: Издательский дом МЭИ, 2012. -Т. 2.с.171-172.
14. Богачев А.В. Включение явнополюсного синхронного генератора на параллельные работы. // XIV международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Программа МКЭЭЭ - 2012, Крым-Алушта, 2012. -с.142-144.
15. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Автоматическая система регулирования напряжения автономного синхронного генератора с самовозбуждением. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XIX междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 3-х т. - М.: Издательский дом МЭИ, 2013,-Т. 2. -С.140.
16. Богачев А.В., Котеленец Н.Ф. Моделирование автономного синхронного генератора, работающего на подзаряд аккумуляторной батареи. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XX междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 3-х т. - М.: Издательский дом МЭИ, 2014. - Т.2. - С.140-141.
17. Бордецкий, А. Б. Пакет программ РОМАХ поиска глобального экстремума функции в условиях большой размерности / А. Б. Бордецкий, Л. С. Казаринов, Г. А. Поллак // Алгоритмы и программы: сб. науч. тр.- М.: ВНИИЦ, 1980. - № 4(36). - С. 33.
18. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS/ О.Б. Буль. – М.: Академия, 2006. - 288 с.

19. Буль, О.Б. Точность расчета осесимметричной и трехмерной магнитных систем с помощью ANSYS // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 364-377.

20. Вольдек, А. И. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей // Электричество. – 1966. - № 7. - С. 46—52.

21. Гамидов, Р. Г. О принятии решения в задачах многокритериальной оптимизации / Р. Г. Гамидов, М. Ш. Фабер // Изв. АН Азерб. ССР. Сер.: Физ. и мат. науки. – 1978. - № 3.

22. Ганджа, С. А. Анализ магнитного поля стартер-генератора комбинированного возбуждения // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.73-76.

23. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления для ветроэнергетической установки 10 кВт // Ресурсосбережение и возобновляемые источники энергии: экономика, экология, опыт применения: по материалам I Междунар. науч.-практ. конф., г. Улан-Удэ, 2008г.: Прил. к журн. «Вестник Междунар. акад. наук экологии и безопасности жизнедеятельности». - СПб. - Чита, 2008. - Т.13, №3. - С. 117-120.

24. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления для ветроэнергетической установки 10 кВт АСГ1220-10000-380/ С.А. Ганджа, Е.С. Мастюкина // Инновационный потенциал. Челябинская область: кат. / М-во экон. развития Челяб. обл.- 2008. - С.30.

25. Ганджа, С. А. Асинхронизированный синхронный генератор с системой управления для ветроэнергетической установки 10 кВт // 60-я юбилейная научная конференция, посвященная 65-летию университета. Секции технических наук: материалы конф./ Южно-Урал.гос. ун-т. - Челябинск, 2008.-Т.1.- С.161-162.

26. Ганджа, С. А. Вентильные электрические машины постоянного тока с аксиальным зазором. Анализ и синтез // Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH, 21-22 апреля 2005 г. - М., 2005. - С. 372-376.
27. Ганджа, С. А. Генератор для автономных источников питания // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». - 2005. - Вып.6, № 9. - С.100-102.
28. Ганджа, С. А. Генератор для ветроэнергетических установок // Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы докл. / Одиннадцатая Всероссийская научно-техническая конференция, 7-9 декабря 2005 г. - Томск, 2005. - С. 84-87.
29. Ганджа, С. А. Дизель-стартер-генераторная установка с высокими массоэнергетическими показателями ДСГУ8-П/28.5-2-М1 // Инновационный потенциал. Челябинская область: кат. / М-во экон. развития Челяб. обл.- 2008. – С.30.
30. Ганджа, С. А. Математическая модель вентильного многосекционного моментного двигателя на основе агрегированных переменных // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1984. - С. 8-13.
31. Ганджа, С. А. Многоуровневая оптимизация вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором (ВМАЗ) // XXV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 60-летию Победы (г. Миасс, 21-23 июня 2005 г.) : тез. докл./ Межрегион. совет по науке и технол. - Миасс, 2005. - С. 57.
32. Ганджа, С. А. Моделирование вентильного электродвигателя постоянного тока с электромагнитной редукцией // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 358-360.

33. Ганджа, С. А. Некоторые проблемы разработки САПР вентильных машин с аксиальным зазором // XXV Российская школа «Итоги диссертационных исследований»: сб. науч. тр./ Рос. акад. наук. - М., 2005. - С. 386-393.
34. Ганджа, С. А. Оптимальное проектирование электроприводов на базе вентильных электрических машин с аксиальным зазором // Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Серия «Энергетика». – 2009. - Вып.12, №34. - С.68-72.
35. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильного моментного двигателя постоянного тока: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01/С. А. Ганджа. - Свердловск, 1985. - 22 с.
36. Ганджа, С. А. Оптимизация параметров вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным воздушным зазором // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XII Бенардосовские чтения): тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 1-3 июня 2005 г./ Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2005. – Т.2. - С. 82.
37. Ганджа, С. А. Особенности построения системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором // Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». - 2007. - Вып.8, № 20. - С.19-23.
38. Ганджа, С. А. Подсистема оптимизации вентильного многосекционного моментного двигателя // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1984. -С. 13-21.
39. Ганджа, С. А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для ветроэнергетических установок // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.168-170.
40. Ганджа, С. А. Применение метода граничной коллокации для расчета магнитных полей в электрических машинах // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр./ Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1983. - С. 3-10.

41. Ганджа, С. А. Применение программного комплекса Ansys для анализа вентильных электрических машин постоянного тока с аксиальным зазором/ С. А. Ганджа, М. С. Свиридов, А. А. Бедекер // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 361-363.
42. Ганджа, С. А. Разработка программного комплекса многоуровневой оптимизации вентильных машин с аксиальным зазором// ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С. 164-167.
43. Ганджа, С. А. Разработка системы автоматизированного проектирования вентильных машин с аксиальным зазором // XXV Российская школа «Итоги диссертационных исследований»: сб. науч. тр./ Рос. акад. наук. - М., 2005. - С. 378-385.
44. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля в вентильных электрических машинах постоянного тока с аксиальным зазором // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: тр. III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.89-91.
45. Ганджа, С. А. Расчет магнитного поля постоянных магнитов стартер-генератора для автономных источников электроснабжения / С. А. Ганджа, А. В. Ерлышева // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т. / Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. – Т.2. - С. 111-115.
46. Ганджа, С. А. Стартер-генератор для автономных источников электроснабжения / С. А. Ганджа, А. В. Ерлышева // Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». - 2005. - Вып.6, № 9. - С. 84-86.
47. Ганджа, С. А. Стартер-генератор для автономных источников электроснабжения / С. А., Ганджа, А. В. Ерлышева // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т./

Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. - Т.1. - С. 76-80.

48. Ганджа, С. А. Экологически чистый возобновляемый источник электрической энергии ветроэнергетическая установка 10 кВт/ С.А. Ганджа, Е.С. Мастюкина // Инновационные разработки малого бизнеса Челябинской области/М-во экон. развития Челяб. обл. - Челябинск, 2007. - Вып.2. - С.30-31.

49. Разработка дизель-стартер-генераторной установки с высокими массоэнергетическими показателями: отчет о НИР (заключ.): по гос. контракту № 4121р/6438. / рук. Ганджа С.А. – М., 2008. – 74 с. - № ГР 15019.7451229854.07.1.001.6.

50. Ветроэнергетическая установка 10 кВт: отчет о НИР (заключ.): по гос. контракту № 4956р/7317/ Рук. Ганджа С.А. – М., 2008. - № ГР 15019.7451229854.07.1.001.9.

51. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Разработка инженерной методики расчета магнитных систем с постоянными магнитами на основе метода конечных элементов. Вестник ПНИПУ. Серия Электротехника, информационные технологии, системы управления – 2019. № 29, -С.58-74.

52. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Применение водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения в качестве альтернативного источника энергии для малых и средних рек. Вестник ЮУрГУ серия энергетика-2019. №4, - С. 102-111

53. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Разработка водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения для освоения энергии малых и средних рек. Вестник СамГТУ.

54. Ганджа С.А., Аминов Д.С. Разработка водопогружного гидрогенератора в качестве возобновляемого источника электроэнергии малых рек. Десятая научная конференция Аспирантов и докторантов ЮУрГУ. 2018

55. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Математическое моделирование постоянного магнита для оптимизации вентильных электрических машин возобновляемых источников энергии. Наука ЮУрГУ 2018.

56. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И Тенденции использования малых гидроэлектростанций в качестве возобновляемых источников энергии в странах центральной Азии. Научно-технические ведомости Севмашвуза – 2019. №2, - Стр. 4-10
57. Геминтерн, В. И. Методы оптимального проектирования/ В. И. Геминтерн, Б. М. Каган. - М.: Энергия, 1980.
58. Геча, В. Я. Расчет характеристик магнитоэлектрических машин методом конечных суперэлементов/ В. Я. Геча, А. Б. Захаренко // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.119-123.
59. Гращенко, В.Т. Некоторые вопросы оптимального проектирования управляемых бесконтактных двигателей постоянного тока // Вторая всесоюзная научно-техническая конференция по бесконтактным машинам постоянного тока: тез. докл. - М., 1975.
60. Дьяков А.Ф. Пути развития Российской электроэнергетики и энергомашиностроения в современных условиях // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.1-3.
61. Евгеньев, Г.Б. Case-технология создания многоагентных САПР изделий машиностроения/ Евгеньев Г.Б. [и др.] // Труды Международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы» и «Интеллектуальные САПР». - Т. 2. -М.: Физматлит, 2003. - С. 41-46.
62. Ермолин, Н. Г. Электрические машины малой мощности/ Н. Г. Ермолин. - М.: Высш. шк., 1967. - 503 с.
63. Иваницкий С. В. Особенности компьютерной модели для расчета генераторного режима линейной асинхронной машины / С. В. Иваницкий, Ф. Н. Сарапулов // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника.

Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.158-160.

64. Иваницкий С. В. Открытые фортранмодели ЛАД на основе детализированных схем замещения // ЭЛМАШ-2009: Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симпозиума: в 2 т. / VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 22-25 сентября 2009 г. - М., 2009. - Т.1. - С.160-163.

65. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: в 2 т. Т. 2. / А. В. Иванов-Смоленский. — 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МЭИ, 2005. - 528 с.

66. Иванов-Смоленский, А. В. Метод расчета магнитных полей с учетом трехмерной неоднородности сердечников электрических машин / А. В. Иванов-Смоленский, В. А. Кузнецов // Электричество. - 2005. - № 11. - С. 2—7.

67. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины/ А. Б. Иоффе. - М.—Л.: Энергия, 1965. - 232 с.

68. Кавун, Ю. Ю. Новые типы синхронных электрических машин с постоянными магнитами/ Ю. Ю. Кавун, Л. К. Ковалев // Проектирование и изготовление аэрокосмических аппаратов / под ред. проф. Ю. Ю. Комарова. – М.: Изд-во МАИ, 2006.

69. Казаков, Ю. Б. Комплексная автоматизированная система исследования двигателей постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1995. - № 4. - С. 21-24.

70. Казаков, Ю. Б. Автоматизированное распределение обмоток статора неявнополусных машин постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1995. - № 8. – С. 8-11.

71. Казаков, Ю. Б. САПР машин постоянного тока на основе декларативных знаний с динамически формируемым алгоритмом расчета / Ю.Б. Казаков, А. И. Тихонов // Электротехника. - 1997. - № 4. - С. 30-32.

72. Казаков, Ю. Б. Конечно-элементное исследование магнитных систем машин постоянного тока с неявно выраженными полюсами / Ю. Б. Казаков, В. С. Мостейкис, А. И. Тихонов // Автоматизированный анализ физических

процессов и проектирование в электромеханике: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. энерг. ун-т. -Иваново, 1990. - С. 33-37.

73. Казаков, Ю. Б. Численное моделирование и разработка конструкций электрических машин с учетом взаимного влияния физических полей: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.09.01/ Ю. Б. Казаков. - М., 2000. - 39с.

74. Казаков, Ю.Б. Оптимизационный конечно-элементный поиск эффективных конструкций машин постоянного тока / Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов // Моделирование и исследование устройств электромеханики: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2001. – С. 43-47.

75. Калаев, В. Е. Актуальность и вопросы использования герметичных электрических машин/ В. Е. Калаев, С. В. Леонов // XI Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Крым, Алушта, 18-23 сентября/Моск. ин-т электротехн. (МЭИ) – М., 2006. – Ч. 1. - С. 196.

76. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферова. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 273 с.

77. Кобелев, А. С. Новые функции интеллектуальной САПР асинхронных электродвигателей версии «AED_AIS 2.0» // ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т. /Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. – Т.2. - С. 43-49.

78. Кобелев, А. С. Агентно-ориентированное программирование как реализация фреймового представления знаний об электрической машине в интеллектуальных САПР // Электротехника. - 2005. - №5. - С. 8-14.

79. Кобелев, А. С. Организация расчетной подсистемы САПР АД на базе системы экспертного программирования SprutExpro // Изв. вузов. Электромеханика. - 2002. - №5. - С.16-21.

80. Кондратьев, В. А. Статические и динамические силы электромагнитных механизмов/ В. А. Кондратьев, В. Л. Малинин // Транспорт: наука, техника, управление. - 2008. - №6. - С.24-26.

81. Копылов, И. П. Некоторые проблемы создания автоматизированных систем проектирования электрических машин // Всесоюзная конференция «Современные проблемы энергетики и электротехники»: тез. докл. - М., 1977.
82. Копылов И.П. Электрические машины / И. П. Копылов. — 5-е изд. - М.: Высш. шк., 2006. - 607 с.
83. Копылов, И. П. Космическая электромеханика/ И.П. Копылов. — 3-е изд. - М.: Высш. шк., 2005. -127 с.
84. Котов, А. А. Разработка математической модели асинхронизированного синхронного ветрогенератора для задачи оптимизации основных геометрических размеров на основе обобщенных переменных / А. А. Котов, И. А. Чуйдук, Н. И. Неустроев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета электротехника, информационные технологии, системы управления. - Пермь.: 2020. –Вып.33. – С.78-99.
85. Красненкер, А. С. Условия оптимальности по Парето // Сб. науч. трудов Воронеж. ун-та по прикл. вопросам. - Воронеж, 1972. -Вып.3.
86. Куприянов, А. Д. Автоматизированное проектирование электромеханических преобразователей с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01/ А. Д. Куприянов. - М., 2004. - 17 с.
87. Кучеров, С. Ю. Поискное проектирование электромеханических устройств / С. Ю. Кучеров, А. И. Тихонов // Вестник науч.-пром. общества. -М.: «Алев-В», 2005. –Вып.9. –С.102-108.
88. Левитин, Е. С. Методы минимизации при наличии ограничений/ Е. С. Левитин, Б. Т. Поляк // Журнал вычислит. математики и мат. физики. - 1966. – Вып. 8, №5. - С. 787-823.
89. Леонов, С. В. Вопросы исследования трехмерного магнитного поля электрических машин с аксиальным магнитным потоком/ С. В. Леонов, А. Г. Каранкевич, О. П. Муравлев // Известия вузов. Электромеханика. - 2004. -№5. - С.8-13.

90. Любимов, Э. В. Системы автоматизированного проектирования электрических машин: учеб. пособие/ Э. В. Любимов / Перм. гос. тех. ун-т. - Пермь, 2001. - 186 с.
91. Любимов, Э. В. Компьютерные технологии для проектирования электрических машин малой мощности // V Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение», МКЭЭЭ-2003 (ICEEE-2003): труды / Ин-т электротехники МЭИ (ТУ). – М., 2003. – Ч.1. - С. 490 -493.
92. Макаричев, Ю. А. Математическая модель синхронного генератора ветроэнергетической установки малой мощности / Макаричев Ю. А., Ануфриев А. С., Зубков Ю. В., Певчев В. П. Вестник Самарского государственного технического университета Серия «Технические науки» –№ 3(55) – 2017. С.66-74.
93. Макаричев, Ю. А. Энергоэффективность генератора ветроэнергетической установки в условиях изменяющейся частоты вращения. / Макаричев Ю. А., Ю. В. Зубков, Ануфриев А. С. Вестник Самарского государственного технического университета Серия «Технические науки» – № 1(57) – 2018. С.77-82.
94. Макаричев, Ю. А. Оптимизация энергетических параметров синхронного генератора малой мощности. / Макаричев Ю. А., Овсянников В. Н., Зубков Ю. В., Ануфриев А.С. Вестник транспорта Поволжья. №3(69) -2018. С.13-19.
95. Макаричев, Ю. А. Критериальный анализ параметров генераторов малой мощности. /Макаричев Ю. А., Ануфриев А. С. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. №2 (62), 2018. с.42-47.
96. Морозов, В. А. Электрооборудование летательных аппаратов. Учебник для вузов. В 2-х томах. Том 2: Элементы и системы электропитания-приемники электрической энергии/ В. А. Морозов, В. И. Нагайцев, С. А. Грузков / Моск. энерг. ин-т (МЭИ). - М., 2008. – 552с.

97. Новиков, А. М. Докторская диссертация: пособие для докторантов и соискателей ученой степени доктора наук / А. М. Новиков, – 3-е изд. – М.: Изд-во «Эгвес», 2003. – 120 с.
98. Новиков, Н. Н. О постановке задачи оптимального проектирования явно полюсных синхронных двигателей / Н. Н. Новиков, В. Ф. Шутько // Автоматизация исследований и проектирования электрических машин и трансформаторов: межвуз. сб. науч. трудов. - Иваново, 1987. – С. 81-86.
99. Ногин, В.Д. Критерии существования решений в конечномерной задаче многоцелевой оптимизации // Вестник ЛГУ. Сер.: Математика, механика, астрономия. – 1980. - №7. - С.27-32.
100. Особенности моделирования магнитных цепей индукторных машин / Д.В. Исаков [и др.] // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. /Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С. 271-273.
101. Пат. 105542 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/00, 21/12. Магнитоэлектрическая машина комбинированного возбуждения с ротором коллекторного типа / Левин Д. В., Лившиц Э. Я., Юхнин М. М; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Сибнанотех". - № 2011102971/07; заявл. 27.01.11; опубл. 10.06.11.
102. Пат. 165187 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/16. Индукторный генератор с комбинированным возбуждением / Калий В. А., Ситин Д. А., Панихин М. В., Мисютин Р. Ю.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Технодинамика". - № 2015155324/07; заявл. 23.12.15; опубл. 10.10.16.
103. Пат. 2030059 Российская Федерация, МПК Н 02 К 5/04. Электродвигатель / Ганджа С. А.; заявитель и патентообладатель С. А Ганджа. - № 5030007/07; заявл. 28.02.92; опубл. 27.02.95.
104. Пат. 2015606 Российская Федерация, МПК Н 02 К 5/22. Электродвигатель / Ганджа С. А.; заявитель и патентообладатель С. А. Ганджа. - № 5039128/07; заявл. 21.04.92; опубл. 30.06.94.

105. Пат. 2244996 Российская Федерация, МПК Н 02 К 19/16, 1/06. Генератор переменного тока / Ганджа С. А., Соломин Е. В., Шауфлер А. Д.; заявитель и патентообладатель С. А. Ганджа. - № 2003124088/09; заявл. 31.07.03; опубл. 20.01.05.

106. Пат. 2696273 Российская Федерация, МПК Н 02 К 21/14, 55/04, 16/00. Двухпакетная индукторная электрическая машина с комбинированным возбуждением (варианты) / Ковалев К. Л., Ильясов Р. И., Кован Ю. И., Дежин Д. С., Егошкина Л. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)". - № 2018144873; заявл. 18.12.18; опубл. 01.08.19.

107. Пат. 2633129 Российская Федерация, МПК В60К 7/00, F16F 7/00. Мотор - колесо транспортного средства и транспортное средство с таким мотор - колесом / Долгов Л. В., Дорошенко А. Н., Тишин А. М.; заявители и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Полимагнит Санкт-Петербург" - № 2016134621; заявл. 24.08.16; опубл. 11.10.17.

108. Пат. 2665017 Российская Федерация, МПК В60К 7/00. Мотор-колесо на базе циклоидального (планетарно-цевочного) редуктора / Гайнуллин Д. Ф., Гайнуллин И. Д., Шалашилин Н. А.; заявители и патентообладатель Гайнуллин Д.Ф. - № 2016128413; заявл. 12.07.16; опубл. 24.08.18.

109. Пат. 2706669 Российская Федерация, МПК В60К 7/00, Н 02 К 3/04, 3/12, 3/28, 3/48, 17/12. Асинхронное мотор-колесо с повышенным магнитным сцеплением / Вагнер В. О., Щуровский Д. В.; заявители и патентообладатели Вагнер В.О., Щуровский Д.В. - № 2018118849; заявл. 10.07.18; опубл. 19.11.19.

110. Пат. 2707429 Российская Федерация, МПК В60L 15/20, 50/60, В60К 7/00. Система управления полноприводным электромобилем / Вагнер В. О., Щуровский Д. В.; заявители и патентообладатели Вагнер В.О., Щуровский Д.В. - № 2019103976; заявл. 13.02.19; опубл. 26.11.19.

111. Пат. 2736473 Российская Федерация, МПК В60К 7/00, В60L 50/00. Мотор-колесо транспортного средства / Романович А. С., Басинюк В. Л.,

Конопляник И. А., Мордосевич Е. И., Конопляник Е. И.; заявители и патентообладатель Унитарное производственное предприятие "Нива" - № 2020102827; заявл. 23.01.20; опубл. 17.11. 20.

112. Пат. на полезную модель 66283 Российская Федерация, МПК В60К 7/00, 17/04, 17/14. Мотор - колесо транспортного средства / Глазков Е. В., Курочкин А. Г.; заявители и патентообладатель Открытое акционерное общество "Ульяновский автомобильный завод" - № 2007115825/22; заявл. 25.04.07; опубл. 10.09.07.

113. Пат. на полезную модель 109052 Российская Федерация, МПК В60К 7/00. Мотор - колесо транспортного средства / Буянов С. Н., Денисов В. М., Шальнев А. П., Яцков В. П.; заявители и патентообладатель Открытое акционерное общество "Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева" - № 2011114071/11; заявл. 11.04.11; опубл. 10.10.011.

114. Пат. на полезную модель 66635 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 9/00. Асинхронизированный синхронный генератор / Ганджа С. А. - № 2007112437/22; заявл.03.04.2007; опубл.10.09.2007, приоритет 03.04.2007.

115. Пат. на полезную модель 56524 Российская Федерация, МПК F 16 Н1/00. Мотор-редуктор / Ганджа С. А., Федоров В. Б., Кулешов В. В., Смирнов В. А. - № 2006115854/22; заявл. 11.05.06; опубл.10.09.06.

116. Пахомеев, Н.В. Разработка колесно-ступичного узла гоночного электроботида класса Formula Student / Н. В. Пахомеев, А. В. Лопухов, И. А. Чуйдук, Г. Н. Салимоненко // Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии - Челябинск.: 2019. - С. 140-147.

117. Пикунов, В. М. Расчет компонентов электронных микроволновых устройств с помощью программного комплекса ANSYS / В. М. Пикунов, К. А. Куров // Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH, 21-22 апреля 2005 г. - М., 2005. - С. 363-371.

118. Пластун, А. Т. Статор асинхронного двигателя малой мощности с кольцевыми обмотками / Пластун, А. Т. [и др.] // «Электромеханика,

электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: XI-я Международная конференция, Украина, Крым, г. Алушта, 18-23 сентября 2006 г.– М., 2006. - Ч. 2. – С. 324-325.

119. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. - М.: Наука, 1982.

120. Полак, Э. Численные методы оптимизации / Э. Полак. – М.: Мир, 1974. – 376с.

121. Попков Е. Н. Макромодель шестифазной синхронной машины в фазных координатах для исследования процессов в электроэнергетических системах / Попков Е. Н., Фешин А. О. // Известия «НТЦ ЕЭС», 2020. № 2 (83). –С.65–74.

122. Программный комплекс моделирования электромагнитных процессов / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, А. Г. Каранкевич, О. П. Муравлев // Оптимизация режимов работы электромеханических систем: межвуз. сб. науч. трудов / Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. - С.127-132.

123. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев. - 4-е изд. / под ред. И.П. Копылова. - М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.

124. Пульсации электромагнитного момента многофазных вентильных моментных двигателей постоянного тока с целым числом пазов на полюс и фазу/ В. А. Лифанов, Г. Н. Мармелев, С. А. Ганджа, С. З. Зильберман // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: темат. сб. науч. тр. / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1985. - С. 3-11.

125. Пупырев, П. В. Упрощенная математическая модель машины переменного тока с кольцевыми обмотками / П. В. Пупырев, А. Г. Цимбулов, А. Т. Пластун // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. /Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.300-308.

126. Расчет магнитного поля в активной зоне аксиальной индукторной

машины с постоянными магнитами в пазах индуктора / Ю. И. Дикин, В. К. Лапшин, Д. Я. Мача, В. А. Пугачев // Бесконтакт. электрич. машины. - Рига, 1980. - Вып. 19. - С. 184—198.

127. Рубцов, Д. В. Разработка конструкции торцевого ветрогенератора с использованием конечно-элементной модели магнитного поля / Д. В. Рубцов, А. И. Тихонов, В. П. Шишкин // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. / Междунар. науч.-техн. конф. - Иваново, 2005. - 88с.

128. Сарапулов, С. Ф. Физическая модель электромагнитного вращателя металлического расплава / С. Ф. Сарапулов, А. А. Идиятулин, С. М. Фаткулин // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: труды III Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 27-29 сентября 2007 г. / Урал. гос. техн. унт-УПИ. - Екатеринбург, 2007. - С.278-281.

129. Семкин, Б. В. К вопросу о рациональном использовании автономных электростанций в труднодоступных районах / Б. В. Семкин, М. И. Стальная, П. П. Свит // Ползуновский альманах. – 1999, № 3. – С. 99-103.

130. Семкин, Б. В. Работа асинхронного генератора с приводным двигателем соизмеримой мощности / Б. В. Семкин, М. И. Стальная, П. П. Свит // Электрические станции. – 2000, № 9. – С. 51-54.

131. Свит, П. П. Стабилизация выходных параметров автономного асинхронного генератора / П. П. Свит, П. Н. Манухин, К. С. Ашиток // Научнотехническое творчество молодежи. Сб.тез.докл. 58-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов, проф.-препод. состава АлтГТУ им. И. И. Ползунова. Ч.1, Барнаул: изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 2000. - С.144.

132. Свит, П. П. Зависимость скорости развозбуждения самовозбуждающегося асинхронного генератора от параметров возбудителя и нагрузки. / П.П. Свит // Научно-техническое творчество молодежи: Сб. тез. докл. 59-й научнотехн. конф. студентов, аспирантов, проф.-препод. состава АлтГТУ им. И. И. Ползунова. Часть 1, Барнаул: изд -во АлтГТУ. – 2001. – С. 103.

133. Свит, П. П. К вопросу о напряжении развозбуждения асинхронного генератора. / П.П. Свит // там же. – С. 104.
134. Свит, П. П. Автобалластная нагрузка в качестве регулятора электрических параметров асинхронных генераторов. / П. П. Свит, А. Р Книппенберг // Научно-техническое творчество молодежи: Сб. тез. докл. 59-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов, проф.-препод. состава АлтГТУ им. И. И. Ползунова. Часть 1, Барнаул: изд-во АлтГТУ. – 2001. – С. 110.
135. Свит, П. П. Определение параметров схем замещения асинхронных двигателей небольшой мощности / П. П. Свит, Б. В. Семкин // Ползуновский альманах. – 2004, № 3. – С. 96-99.
136. Совместный магнитно-тепловой конечно-элементный расчет неявнополюсного двигателя постоянного тока / Е. Б. Герасимов, Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов, Ю. Я. Щелыкалов // Электротехника. - 1996. -№10. –С.39-42.
137. Статников, Р. Б. Решение многокритериальных задач проектирования машин на основе исследования пространства параметров // Многокритериальные задачи принятия решений. - М.: Машиностроение, 1978. - С. 148-155.
138. Столов, Л. И. Моментные двигатели с постоянными магнитами / Л. И. Столов, Б. Н. Зыков. – М.: Энергия, 1977 г. – 112 с.
139. Столов, Л. И. К теории бесконтактных моментных двигателей постоянного тока с неограниченным углом поворота ротора / Л. И. Столов, Ш. С. Галеев // Вторая всесоюзная научно-техническая конференция по бесконтактным машинам постоянного тока: тез. докл. - М.,1975.
140. Технология численного исследования электрических машин с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля/ А. И. Тихонов, С. Ю. Кучеров, И. М. Лашманов, Д. В. Рубцов // Вестник Иван. гос. энерг. у-та. – 2006. – Вып. 3. - С. 5-8.
141. Тихонов, А. И. Разработка моделей и методов анализа и синтеза решений в автоматизированном проектировании электромеханических устройств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.12 / Тихонов Андрей Ильич. - Иваново, 2007. - 280 с.: ил. РГБ ОД, 71 08-5/113.

142. Тихонов, А. И. Методы анализа и синтеза электромеханических устройств на основе компонентной интеграции моделей / Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2006. -100с.
143. Тихонов, А. И. Метод декларативного проектирования электрических машин / А. И. Тихонов, С. Ю. Кучеров // Моделирование и исследование устройств электромеханики: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2001. - С. 57-60.
144. Тихонов, А. И. Имитация работы машины постоянного тока в среде MatLab с использованием конечно-элементной модели магнитного поля / А. И. Тихонов, Е. Ю. Комков, И. М. Лашманов // Электротехника и прикладная математика: сб. трудов, посвященный 200-летию открытия электрической дуги В. В. Петровым и 160-летия со дня рождения Н. Н. Бенардоса / Иван. гос. энерг. ун-т. - Иваново, 2003.- С. 81-84.
145. Тихонов, А. И. Интегрированная исследовательская среда математического моделирования электромеханических устройств // Вестник науч.-пром. общества. - М.: «Алев-В», 2005. – Вып.9. – С.55-59.
146. Тубис, Я. Б. База знаний «Теплоventилиционный расчет асинхронных двигателей» как составная часть расчетной подсистемы интеллектуальной САПР АЭД / Я. Б. Тубис, А. Э. Кравчик, А. С. Кобелев // Электротехника. - 2004. - №7. - С. 2-8.
147. Уайлд, Д. Д. Методы поиска экстремума: [пер с англ.]. - М.: Наука, 1967. – 268 с.
148. Федий, К. С. Низкоскоростной синхронный генератор автономных источников электроснабжения: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / К. С. Федий. - Красноярск, 2007. - 20 с.
149. Федоров, А. Г. Вентильно-индукторные электродвигатели общепромышленного применения – оптимальное проектирование: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003611806 от 29.07.2003 г.
150. Федянин, А. Л. Анализ применения дисковой машины с магнитной связью двух роторов в составе оборудования ядерно-химической отрасли /

А. Л. Федянин, С. В. Леонов, О. П. Муравлев // Современные техника и технологии: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Томск, 26-30 марта 2007 г. / Томский политехн. ун-т. - Томск, 2007. - С. 346-347.

151. Федянин, А. Л. Герметичный синхронный двигатель для химического производства: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.01/ А. Л. Федянин. - Томск, 2007. – 20 с.

152. Федянин, А. Л. Информационные технологии в моделировании электромеханических систем / А. Л. Федянин, С. В. Леонов // Наука. Технологии. Инновации: материалы всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 8-11 декабря 2005 г. / Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2006. – Т. 1. -С. 258-259.

153. Федянин, А. Л. Исследование синхронного двигателя дискового типа со смещением полюсов / А. Л. Федянин, А. В. Лялин, С. В. Леонов // Современные техника и технологии: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых, Томск, 27-31 марта 2006 г. / Том. политехн. ун-т. - Томск, 2006. - С. 297-300.

154. Федянин, А. Л. Программный комплекс моделирования электромеханических устройств / А. Л. Федянин, С. В. Леонов, О. П. Муравлев // Электромеханические преобразователи энергии: материалы междунар. науч.-техн. конф. / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2005. - С.163-165.

155. Чуйдук, И. А. Разработка электротрансмиссии электроболида с учетом регламента соревнований «Формула студент»/ И. А. Чуйдук, А. Е. Ларин, Г. Н. Салимоненко, А. В. Лопухов, Н. В. Пахомеев // Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии - Челябинск.: 2019. - С. 165-174.

156. Чуйдук, И. А. Дизель-стартер-генераторная установка с высокими массоэнергетическими показателями / И. А. Чуйдук, С. А. Ганджа // Материалы 4-й научной выставки-конференции научно-технических и творческих работ студентов. Министерство образования и науки Российской Федерации; Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2017. С 89-97.

157. Шишкин, В. П. Бесконтактные магнитоэлектрические генераторы для ветроэнергетических установок/ В. П. Шишкин, Ю. Б. Казаков // Состояние и перспективы развития электротехнологии: тез. докл. / Междунар. науч.-техн. конф. - Иваново, 2005. – С.230.
158. Щелькалов, Ю. Я. О применении численных методов для расчета физических полей // Теория и расчеты электрических машин и аппаратов: межвуз. сб. науч. трудов / Иван. гос. ун-т Иван. энерг. ин-т. - Иваново, 1978.
159. Щетина, В. А. Электромобиль: техника и экономика // В. А. Щетина, Ю. Я. Морговский, Б. И. Центр, В. А. Богомазов - М.: Машиностроение, 1987. – 155 с.
160. Якорь машины переменного тока с кольцевой обмоткой /А. Т. Пластун, П. В. Пупырев, А. В. Мельчанов, Д. Г. Киселев// ЭЛМАШ-2006: Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: тр. симпозиума: в 2 т. /Шестой междунар. симпозиум, Москва, 2-6 октября 2006 г. - М., 2006. – Т.2. - С.158-163.
161. Якунин, А. Н. Проблемы адаптации конечно-элементных сеток в ANSYS и практические приложения адаптивных сеток / А. Н. Якунин, А. Н. Цой // Сб. трудов Шестой конференции пользователей программного обеспечения CAD_FEM GmbH (20-21 апреля 2006 г.) - М., 2006. - С. 351-357.
162. Aydin, M. S. Huang and T. A. Lipo. “Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review”, In Conf. Record of SPEEDAM, May 2004, pp. 61-71
163. Akatsu K. and Wakui S. “A comparison between axial and radial flux PM motor by optimum design method from the required NTcharacteristics”, Conference Proceeding of ICEM2004, No. 361, Cracow-Poland, 2004.
164. ANSYS Manual. Revision 6.0. ANSYS Inc/2002.-2567 p.
165. Cingoski V., Murakawa R., Kaneda K. and Yamashita H. Automatic mesh generation in finite element analysis using dynamic bubble system // Jornal of Applied Physics, 1997, Vol.81, No.8, Part 2, pp.4085-4087.
166. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets. 2018 International

Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 15-18 May 2018, Moscow, Russia. DOI: [10.1109/ICIEAM.2018.8728650](https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728650).

167. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms. Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018 Chelyabinsk, Russia. DOI: [10.1109 / URALCON.2018.8544320](https://doi.org/10.1109/URALCON.2018.8544320) pp. 282-287

168. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I., Bakhtiyor K. Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux. 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC) 13-15 Nov. 2018. Chelyabinsk, Russia DOI: [10.1109 / GloSIC.2018.8570132](https://doi.org/10.1109/GloSIC.2018.8570132)

169. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Development of Engineering Method for Calculation of Magnetic Systems for Brushless Motors Based on Finite Element Method. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), ECF Paper 25-29 March 2019 Sochi, Russia, DOI: [10.1109 / ICIEAM.2019.8742976](https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8742976).

170. Gandzha S., Bakhtiyor K., Aminov D. Development of a system of multi-level optimization for Brushless Direct Current Electric Machines. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural Con) 2019. 1-3 Oct. 2019 Chelyabinsk, Russia. DOI: [10.1109/URALCON.2019.8877650](https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877650).

171. Gandzha S., Aminov D., Bakhtiyor K. Application of the combined excitation submersible hydrogenerator as an alternative energy source for small and medium rivers. IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry. 4-5 Oct. 2019 Magnitogorsk, Russia. DOI: [10.1109 / PEAMI.2019.8915294](https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915294).

172. Gandzha S., Chuyduk I., Nazarov M. Development of a Motor-Wheel Based on a Brushless Machine of Combined Excitation for Hybrid and Electric Transport. Proceedings – 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon. – September 2021. DOI: [10.1109/UralCon52005.2021.9559479](https://doi.org/10.1109/UralCon52005.2021.9559479).

173. Gandzha S., Neustroev N., Chuyduk I., Shabiev S. Design of a Combined Magnetic and Gas Dynamic Bearing for High-Speed Micro-Gas Turbine Power Plants with an Axial Gap Brushless Generator. Processes "Nonlinear Electromechanical Systems" May 2022. DOI: doi.org/10.3390/pr10061067.
174. George P.L. Meshing: Construction, Optimization and Adaptation.// Proceeding of 8th International Roundtable. South Lake Tahoe. CA, USA, 1999, pp. 133-144.
175. Kotov A., Neustroev N., Chuyduk I. Mathematical Modeling Asynchronized Synchronous wind Turbine Generator on the Basis of Generalized Variables with the Purpose of Main Machine Geometrical Parameters Optimization. Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. – May 2020. – № 9111967. DOI: [10.1109/ICIEAM48468.2020.9111967](https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111967)
176. Magnet Materials - Fundamentals, Design and Application, July 2000.
177. Holmes F. H., Pat. 2060 and 2665 (London), 1868.
178. Makarichev, Yu.A. Low - power wind generator / Makarichev Yu.A., Anufriev A.S., Ivannikov, Y.N., Didenko, N., Gazizulina, A. International Conference on Information Networking Volume 2018-January, 19 April 2018, Pages 671-672. 32nd International Conference on Information Networking, ICOIN 2018;
179. Marcuin D.L. and Gaither A. Unstructured Surface Grid Generation Using Global Mapping and Physical Space Approximation. // Proceeding of 8th International Roundtable. South Lake Tahoe. CA, USA, 1999, pp. 37-46.
180. Neustroev N., Kotov A., Chuyduk I. Starter Generator Design Development for Modern Micro Gas Turbine Plant/ N. Neustroev, A. Kotov, I. A. Chuyduk // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. – May 2020. – № 9111922. DOI: [10.1109/ICIEAM48468.2020.9111922](https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111922)
181. Neustroev N., Gandzha S., Chuyduk I. Passive Magnet Bearing Development for Axial Flux Permanent Magnet Generator with Diamagnetic Armature. Proceedings – 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of

Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI. – September 2020. – № 9234313.

DOI: [10.1109/PEAMI49900.2020.9234313](https://doi.org/10.1109/PEAMI49900.2020.9234313).

182. Satoh H., Akutsu S., Miyamura T., and Shinoki H., “Development of Traction Motor for Fuel Cell Vehicle,” SAE Technical Paper Series (Paper No. 2004-01-0567), reprinted from Advanced Hybrid Vehicle Powertrains 2004 (SP-1833).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОПИСАНИЕ РАБОТ ЗАРУБЕЖНЫХ УЧЕНЫХ ПО РАЗРАБОТКЕ МОТОР-КОЛЕС

1. Evolution eines selbst entwickelten Motors für die Formula Student Electric

(Мотор собственной разработки для Formula Student Electric)

Страна изобретения:	Швейцария	Год издания:	2015
Организация:	der Akademische Motorsportverein Zürich (AMZ)		
Авторы:	Urs Steiner является техническим директором и отвечает за концепцию и конструкцию двигателя		

Соревнования Formula Student Electric характеризуются многочисленными инновациями в области силовых агрегатов. Академический автоспортивный клуб Цюриха (AMZ) уже пять лет разрабатывает собственные электродвигатели. Они оптимизированы по производительности и крутящему моменту на единицу веса и являются одними из лучших в мире по размеру.

Вес, кг	3,25
Размеры (диаметр × длина), мм	160 × 91,5
Максимальный крутящий момент, Нм	28,3
Максимальная скорость вращения, об/мин	20 000
Максимальная мощность (ограничена инвертором), кВт	37
Удельная мощность, кВт/кг	11,7
Непрерывная мощность (термически ограниченная), кВт	8
Максимальная эффективность (двигатель + преобразователь), %	97



2. Radnabenmotor mit Getriebe für Pkw

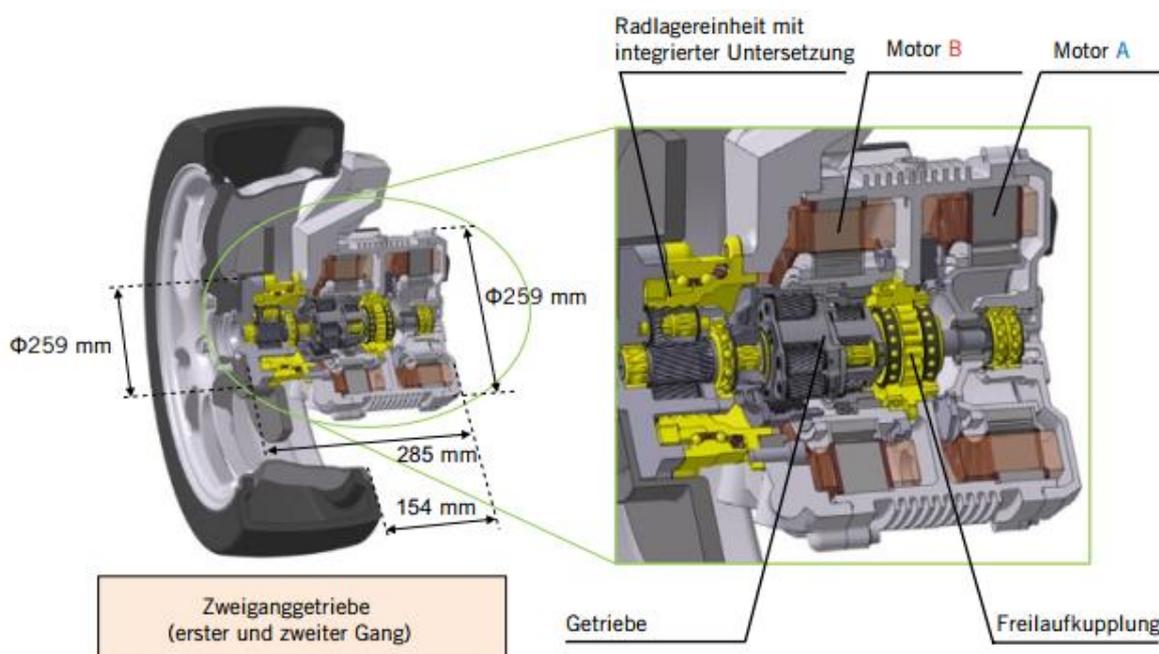
(Мотор-колесо с редуктором для легковых автомобилей)

Страна изобретения:	Япония	Год издания:	2018
Организация:	Центре разработки технологий силовых агрегатов в NSK Ltd. в Токио (Япония)		
Авторы:	Shin Yamamoto, магистр наук (инженер); Ryuhō Morita, магистр наук (инженер); Mitsuru Oike, магистр наук (инженер);		

В настоящее время NSK разработала новые приводы мотор-колес, которые в настоящее время проходят испытания на концептуальном автомобиле.

С помощью мотор-колеса компания NSK разработала новую концепцию компактного и мощного привода для электромобилей, который обеспечивает как высокий крутящий момент, так и достаточную максимальную скорость. Этот привод доказал свою практическую пригодность на испытательном автомобиле.

Вес, кг	32
Максимальная мощность, кВт	25
Максимальный крутящий момент, Нм (первая передача)	850
Максимальный крутящий момент, Нм (вторая передача)	400
Максимальная скорость, км/ч	135
неподдрессоренная масса, кг	23,7
Номинальное напряжение батареи, В	400



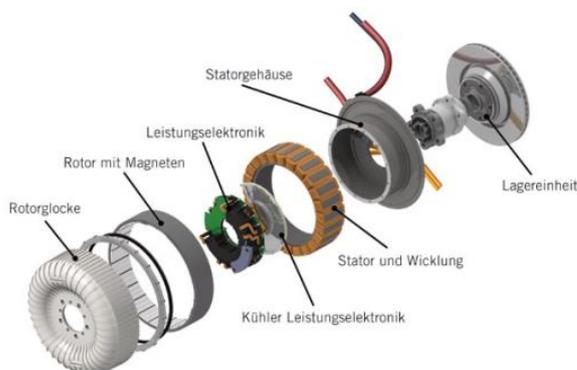
3. Elektrischer Radnabenmotor

(Электрическое мотор-колесо)

Страна изобретения:	Германия	Год издания:	2012
Организация:	das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM (Институт производственных технологий и прикладных исследований материалов IFAM в Бремене)		
Авторы:	Michael Gröninger руководитель проекта и научный сотрудник; Felix Horch работает руководителем группы по разработке компонентов; Alexander Kock работает менеджером проекта и научным сотрудником; Доктор Hermann Pleteit работает научным директором в отделе литейных технологий;		

Технические задачи, решаемые в данном мотор-колесе: защита от неблагоприятных воздействий окружающей среды, обеспечение высокой плотности крутящего момента, простая интеграция в шасси, а также комплексные меры безопасности. Благодаря сочетанию рекуперативного торможения с классической механической тормозной системой и резервной конструкцией двигателя была создана система привода, которая работает и в случае неисправности.

Мощность, кВт	55
Номинальный крутящий момент при 550 об/мин, Нм	700
Максимальный крутящий момент (кратковременный), Нм	900
Внешний диаметр мотора-ступицы, мм	364
Общая масса, кг	42
КПД, %	92



4. Entwicklung Eines CFK-leichtbaurads mit integriertem Electromotor

(Разработка легкого колеса из углепластика со встроенным электродвигателем)

Страна изобретения:	Германия	Год издания:	2012
Организация:	Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF (Институт Фраунгофера по прочности конструкций и надежности систем LBF)		
Авторы:	Nicole Schweizer - научный сотрудник Центра компетенций в области долговечных и легких конструкций; Andreas Giessler научный сотрудник в Центре компетенций по прочным легким конструкциям Oliver Schwarzhaupt - научный сотрудник Центра компетенций по прочным легким конструкциям		

В Институте конструктивной прочности и надежности систем имени Фраунгофера LBF было разработано и изготовлено облегченное мотор-колесо из волокнистого композита со встроенным электродвигателем.

Само легкое колесо с размером колеса $6,5 \times 15$ дюймов имеет вес около 3,5 кг - без металлических деталей, таких как втулки для подшипников и винтов и без компонентов двигателя. По сравнению со стальным колесом одинакового размера, в зависимости от конструкции колеса, экономия веса достигает 60%, экономия веса по сравнению с литым алюминиевым колесом составляет до 56% в зависимости от рассматриваемой конструкции. Общий вес легкого колеса с углепластиком со встроенным электродвигателем составляет около 18 кг.

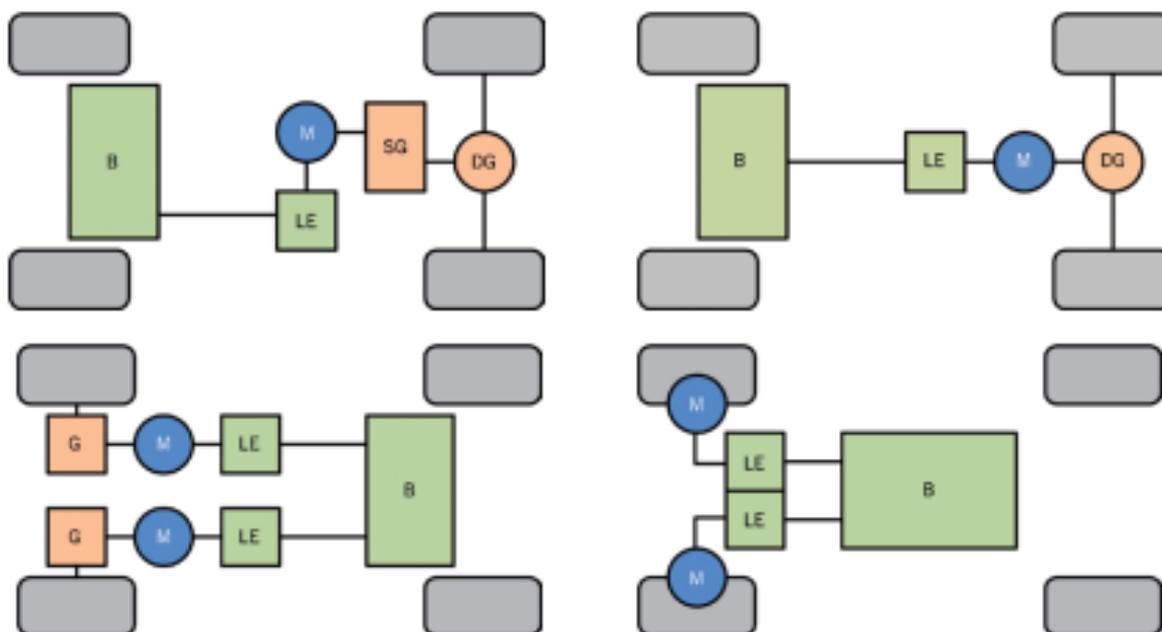


5. Elektrische fahrtriebe Topologien und Wirkungsgrad

(Компоновка и КПД электроприводов для электротрансмиссий)

Страна изобретения:	Германия	Год издания:	2012
Организация:	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Магдебургский университет Отто-фон-Герике)		
Авторы:	Проф. д.т.н. Roland Kasper инженер Martin Schünemann		

Новые топологии силовых агрегатов для электромобилей могут быть разработаны с учетом параметров конкретных характеристик и различных конструкций электрических машин. Они варьируются от обычного центрального двигателя с двухступенчатой механической коробкой передач и дифференциалом до колесных редукторов и мотор-колес. Постепенное уменьшение количества компонентов механического привода повышает общую эффективность трансмиссии. Это может снизить потребление энергии автомобиля среднего класса примерно на 32%.



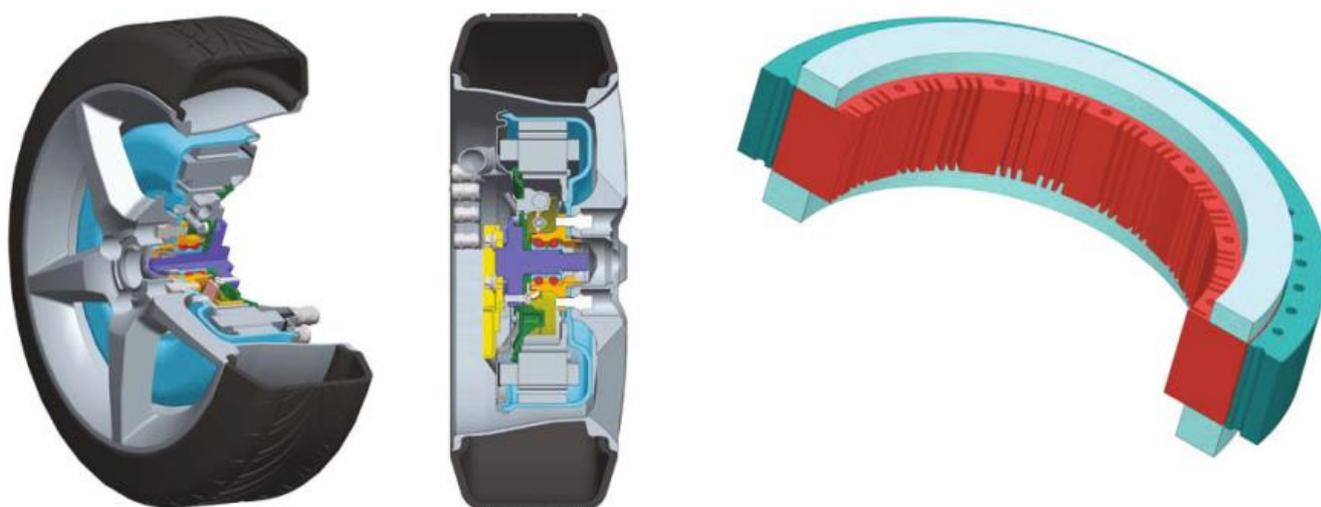
Различные компоновки трансмиссий для электромобилей

6. Elektrische Radnabenmotoren Konstruktionskriterien und Fahrzeugintegration

(Критерии проектирования электрических двигателей для мотор-колес транспортных средств)

Страна изобретения:	Германия	Год издания:	2010
Организация:	Der Schaeffler KG (компания Schaeffler KG в Херцогенаурахе)		
Авторы:	Bernd Gombert - руководитель отдела мехатроники в компании; Raphael Fischer - специалист по приводным системам; Wolfgang Heinrich - специалист по электродвигателям;		

Группа Schaeffler разработала мотор-колесо (с ободом 17 дюймов) для городского автомобиля, пригодного для движения по шоссе. Этот мотор можно прикрепить к существующей конструкции моста без внесения существенных изменений в соединение со стороны автомобиля. Проверенные стандартные компоненты, такие как ступичный подшипник и тормоз, остаются неизменными, что делает этот новый модуль полного привода «подключи и работай». Представленные исследования показали, что дополнительная масса до 30 кг в автомобиле среднего класса не является критической с точки зрения безопасности движения. Таким образом, часто негативно оцениваемое влияние «неподрессоренной массы» может быть аннулировано.

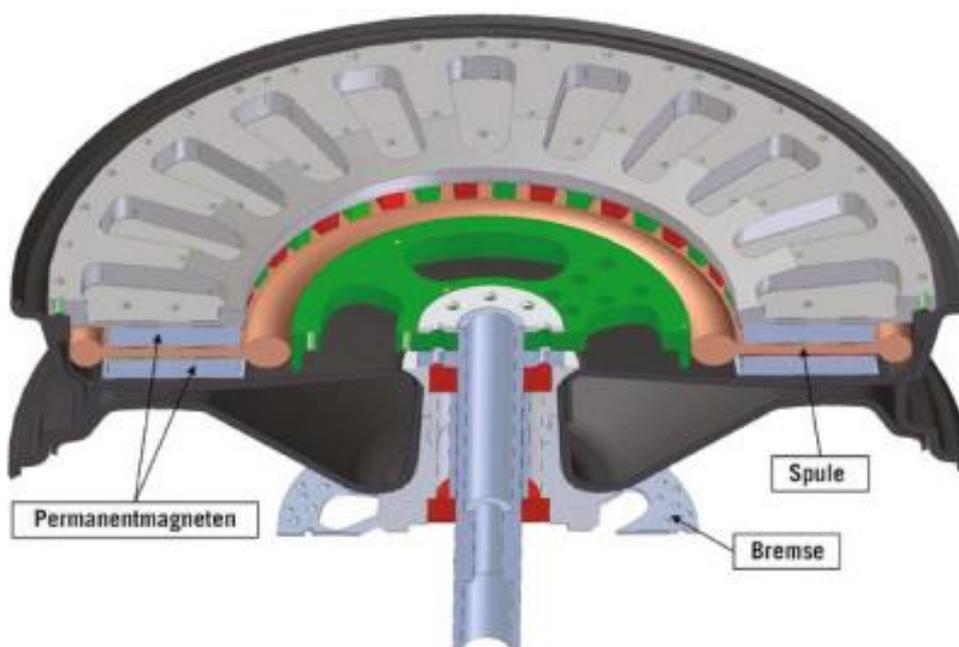


7. Elektrische Radnabenmotoren für leichte Stadtfahrzeuge

(Электрические мотор-колеса для легких городских транспортных средств)

Страна изобретения:	Германия	Год издания:	2010
Организация:	Das Ingenieurbüro Evomotiv GmbH und die University of Applied Sciences Offenburg (Конструкторское бюро Evomotiv GmbH и Университет прикладных наук Оффенбурга)		
Авторы:	Gerhard Krebs - управляющий директор инженерного бюро; Rolf Weber возглавляет отдел разработки электроники; Simon Leppelsack - руководитель проекта; Ulrich Hochberg является деканом магистерской факультета машиностроения;		

Конструкторское бюро Evomotiv GmbH и Университет прикладных наук Оффенбурга разрабатывают концепцию привода для легких городских автомобилей. Целью электропривода является сделать высокоинтегрированные, безредукторные и не содержащие железа мотор-колеса подходящими для серийного производства. Федеральное министерство экономики и технологий (BMWi) поддерживает проект. Концепция двигателя для мотор-колес получила премию Bosch за инновации и стала победителем Shell Eco Marathon.

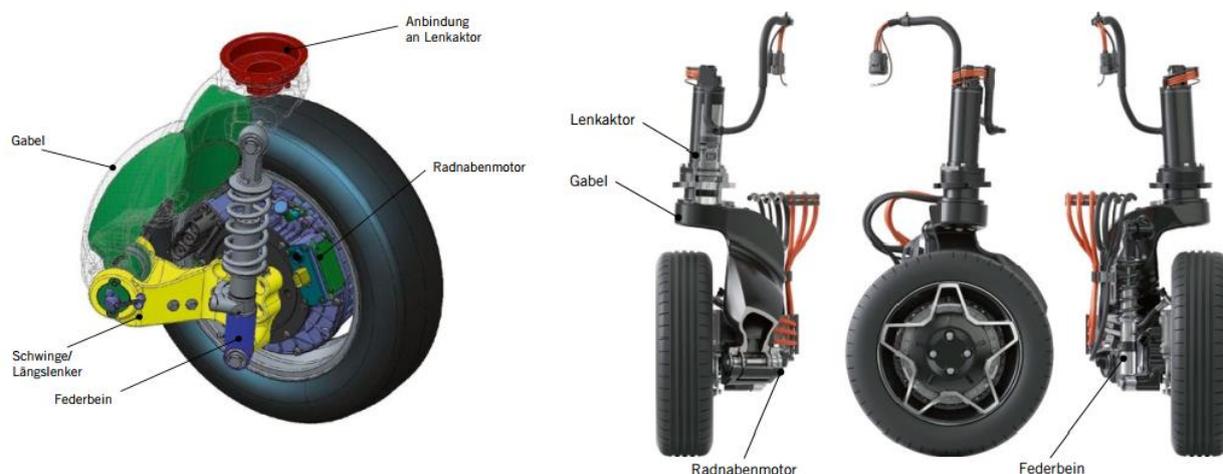


8. Verschmelzung von Antrieb und Fahrwerk für einen People Mover

(Сочетание привода и шасси для пассажирского транспорта)

Страна изобретения:	Германия	Год издания:	2018
Организация:	Schaeffler Technologies AG & Co. KG in Herzogenaurach		
Авторы:	Manfred Kraus Christian Harkort Benjamin Wuebbolt-Gorbatenko Martin Laumann		

Компания Schaeffler разработала решение для пассажирских перевозок и внедрила его в качестве готового к эксплуатации прототипа в рамках технико-экономического обоснования. Исследование Schaeffler Mover представляет собой электрическое транспортное средство для местного общественного транспорта и формирует основу для интеграции высокоавтоматизированных функций вождения. Техническим краеугольным камнем четырехместного малолитражного автомобиля является, с одной стороны, модульная конструкция транспортного средства, так что многочисленные задачи по перевозке людей и грузов могут быть реализованы с помощью единой конструкции шасси. С другой стороны, компания Schaeffler разработала инновационный колесный модуль, в котором мотор-колесо сочетается с электромеханической системой рулевого управления в одном компактном устройстве. Реализованный таким образом полный привод и рулевое управление обеспечивают автомобилю высокую устойчивость при движении, а также делают его чрезвычайно маневренным в городском потоке.

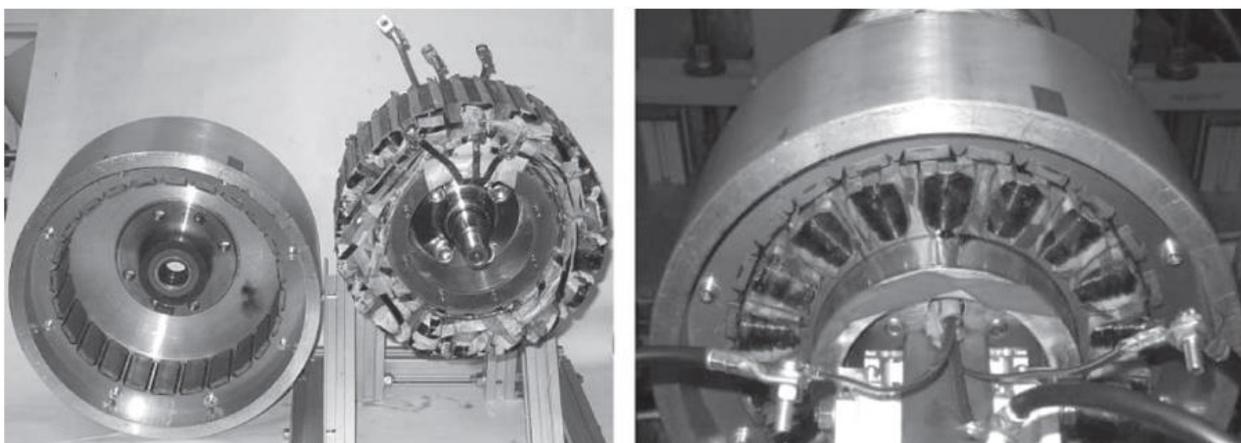


9. Elektrofahrzeuge mit PermanentmagnetSynchronmaschinen

(Электромобили с синхронными машинами с постоянными магнитами)

Страна изобретения:	Австрия	Год издания:	2011
Организация:	TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN (Венский технический университет)		
Авторы:	Andreas Eilenberger Manfred Schro Florian Demmelmayr		

В статье показан широкий спектр возможностей для использования синхронных машин с постоянными магнитами. В статье показаны различные варианты электрической тяги и их различные варианты реализации в конструкции с учетом конструкции ротора, вариантов обмотки, ослабления поля и стойкости к короткому замыканию. Кратко представлено регулирование, в частности бездатчиковое регулирование. Также были объяснены возникающие проблемы в управлении оптимизированным крутящим моментом.



**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ЧЕРТЕЖИ НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫХ УЗЛОВ
КОНСТРУКЦИИ МОТОР-КОЛЕСА**

Формат Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Приме- чание
<i>Сборочные единицы</i>					
	9	МК01 001. 001. 000.	Сателлит	4	
	11	МК01 001. 002. 000	Ступицный узел	1	
	6	МК01 001. 003. 000	Магнитная система	1	
<i>Детали</i>					
	1	МК01. 001. 000. 001.	Статор	1	
	2	МК01. 001. 000. 002	Крышка ОБ	1	
	3	МК01. 001. 000. 003	Лист Якоря	2	
	4	МК01. 001. 000. 004.	Текстолитовая вставка	1	
	5	МК01. 001. 000. 005	Ротор	1	
	7	МК01. 001. 000. 007.	Водило	1	
	8	МК01. 001. 000. 008	Ось главная	1	
	10	МК01. 001. 000. 010.	Крышка водила	1	
	13	МК01. 001. 000. 013	Солнечная шестерня (первичная)	1	
	14	МК01. 001. 000. 014	Крепежное кольцо пакета якоря	2	
	15	МК01 001. 000. 015	Лопатка	1	
	16	МК01. 001. 000. 0016.	Ступицная гайка	1	
	17	МК01 001. 002. 003.-01	Дистанционная втулка ступицы	1	
	18	-02	Дистанционная втулка ступицы	1	
МК01 001. 001. 000					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
Разраб.		Чуйдук И. А.			
Проб.		Федоров В. Б.			
Н.контр.					
Утв.					
Мотор-колесо			Лит.	Лист	Листов
				1	2
			СКБ ЮУрГУ		

КОМПАС-3D v17.1. Учебная версия © 2017 ООО "АСКОН-Системы проектирования", Россия. Все права защищены

Не для коммерческого использования

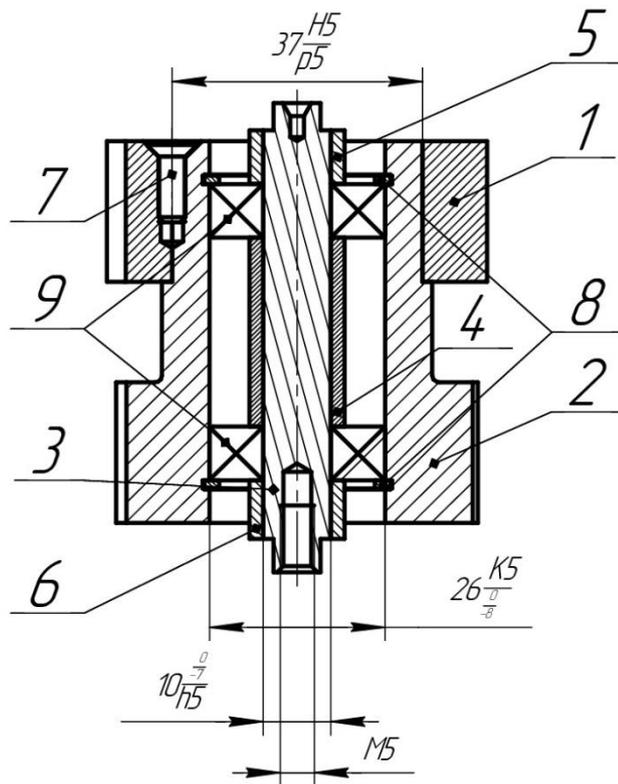
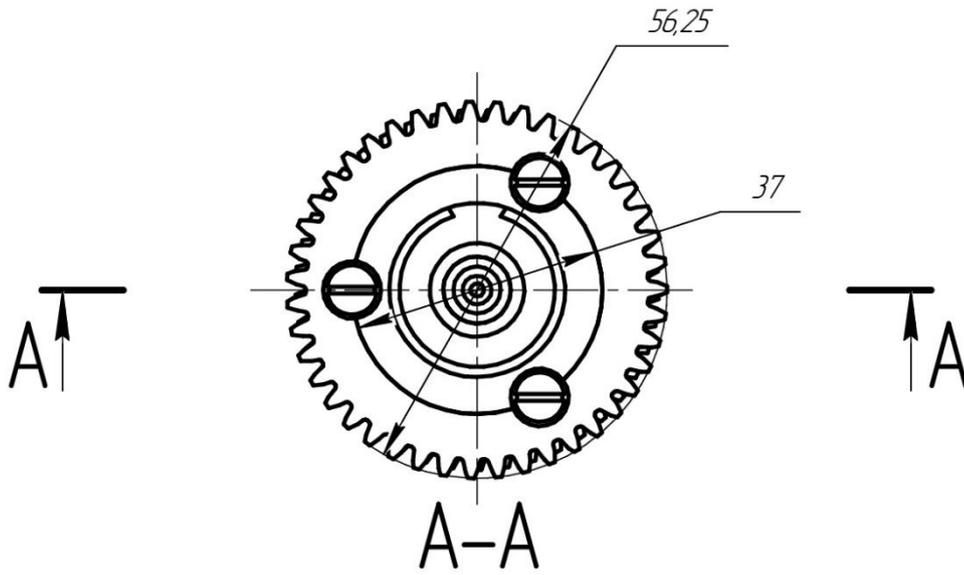
Копировал

Формат А4

МК01.001.001.000.СБ

Перв. примен.

Справ. №



КОМПАС-3D v17.1 Учебная версия © 2017 ООО "АСКОН-Системы проектирования", Россия. Все права защищены

Подл. и дата

Взам. инв. №

Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Чудиук И. А.		
Проб.		Федоров В. Б.		
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.		Ганджа С. А.		

МК01.001.001.000.СБ

Сателлит
Сборочный чертеж

Лист	Масса	Масштаб
	0,74	1:1
Лист	Листов 1	

СКБ ЮУрГУ

Не для коммерческого использования

Копировал

Формат А4